P2-40

annales agronomiques

FICHÉ

Bibliothèque de la
Station de
BIOCLIMATOLOGIE
I. N. R. A.
Versailles

29 JUIL. 1980

Bimestriel

1980

Vol. 31. N° 1

inra

AAG
31.1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 31 (1) 1-107 (1980)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., Paris Cedex 75231

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur de la Station de Biochimie et Physico-Chimie des céréales et de leurs dérivés C. E. R. D. I. A., le Noyer Lambert, 91300 Massy.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— F. GROSCLAUDE, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— J. ASSO, Station de Virologie, Immunologie, Route de Thiverval, 78850 Thiverval-Grignon.

Reproduction, Nutrition, Développement. Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante: C. N. R. Z. 78350 Jouy-en-Josas.

— Ch. THIBAULT.
— L. GUÉGUEN.
— G. PÉTRISSANT.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES. Tél. (3) 950-75-22

annales agronomiques

Bimestriel

1980

Vol. 31. N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1980, **31** (1), 1-17.

Déplacement avec mélange des nitrates dans un matériau de porosité bimodale

A. MORISOT

avec la collaboration technique de J. P. TOURNIER

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale
Centre de Recherches agronomiques d'Antibes, I.N.R.A.,
B. P. 78, 06602 Antibes

Résumé

Des déplacements d'eau pure par une solution de nitrate de potassium ont été réalisés à différentes vitesses, en milieu saturé, sur trois catégories d'empilements d'agrégats poreux de diamètres équivalents moyens respectifs 350, 750 et 2 500 μ.

Sauf aux plus grandes vitesses, l'équation de dispersion, $\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$, permet de prévoir efficacement les courbes d'élution des nitrates. Le coefficient de dispersion K varie avec le nombre de Péclet moléculaire qui dépend de la vitesse du déplacement et du diamètre moyen des agrégats, selon l'allure générale déjà observée sur les milieux de porosité unimodale. Mais pour un diamètre moyen fixé, la dispersion croît beaucoup plus vite avec la vitesse dans une porosité bimodale, et d'autant plus vite que la taille des particules est plus grande.

D'autre part, ces résultats confirment les courbes théoriques publiées par Rose (1973), et l'existence d'un minimum pour le volume de mélange à une vitesse relativement faible.

Liste des symboles utilisés

- c : Concentration de l'effluent.
- c_i : Concentration de la solution déplacée.
- c_0 : Concentration de la solution déplaçante.
- d : Diamètre moyen des particules (cm ou μ).
- d_a : Densité apparente sèche de la colonne.
- d_r : Densité réelle du matériau poreux (sépiolite).
- D_0 : Coefficient de diffusion moléculaire dans l'eau. $D_0 = 1{,}85\ 10^{-5}$ cm²/s pour KNO_3 N/100 à 25 °C.
- K : Coefficient de dispersion hydrodynamique ou encore de dispersion apparente (cm²/s).
- L : Longueur de la colonne (cm).
- n : Nombre de résultats utilisés dans le calcul de la régression.
- p : Volume écoulé par rapport au volume des pores.
- P : Nombre de Péclet $P = vd/D_0$ (sans dimension).
- r : Coefficient de corrélation linéaire.
- S : Pente de la tangente à la courbe d'élution au point d'abscisse $p = 1$.
- t : Temps (s).
- v : Vitesse moyenne du déplacement dans la porosité (cm/s).
- V : Volume d'effluent (cm³).
- V_0 : Volume de la porosité de la colonne (cm³).
- x : Coordonnée dans le sens du déplacement (cm).
- ε ou ε_T : Porosité totale du matériau (cm³/cm³).
- ε_A : Porosité à l'intérieur des agrégats, ou microporosité (cm³/cm³).
- ε_M : Porosité entre les agrégats ou macroporosité (cm³/cm³).
- θ_v : Teneur en eau (cm³/cm³).
- Ψ : Potentiel de l'eau dans le matériau poreux (cm d'eau).

Introduction

On connaît aujourd'hui la généralité du déplacement avec mélange de solutions dans un sol. On peut aisément donner plusieurs exemples de situations où le progrès technique demande une meilleure connaissance des processus de dispersion hydrodynamique de deux fluides miscibles :

- pour maîtriser les apports d'éléments nutritifs ou de produits phytosanitaires en cultures irriguées ou non,
- ou pour contrôler le niveau de fertilité du sol lors de l'alternance d'irrigations simples et fertilisantes, notamment en cultures maraîchères et horticoles.

Les recherches sur ce thème sont donc nombreuses. Dans les travaux les plus anciens, les modèles étudiés étaient très généralement des milieux de porosité relativement simple : empilements de particules pleines, sables ou billes de verre, de granulométrie homogène ou encore sols limoneux ou sableux tamisés. Se référer, entre autres, aux mises au point de Nielsen et Biggar (1961, 1962, 1963, 1972), Kirkham et Powers (1972), Calvet et Graffin (1974).

Une première tentative d'étude d'une porosité plus complexe a été menée par Passioura et Rose (1971-1973). Ces auteurs ont utilisé des empilements d'agrégats poreux. Ils disposent ainsi d'une porosité nettement bimodale, répartie en une porosité grossière entre les agrégats et une porosité fine située en majeure partie à l'intérieur de ces agrégats. Par commodité de langage, ces deux catégories de porosité sont respectivement appelées « macroporosité » et « microporosité ». L'intérêt de leur étude a été de mettre en évidence une influence complexe de la vitesse du déplacement sur la dispersion hydrodynamique et dans une certaine mesure, différente de celle observée avec des milieux de porosité unimodale.

Nous avons essayé de poursuivre ces travaux en étudiant les influences de la vitesse du déplacement et de la taille des agrégats poreux sur la dispersion hydrodynamique de solutions miscibles en milieu saturé. Pour cela, nous nous sommes limités à un seul matériau (sépiolite), mais avec une gamme étendue de diamètres apparents des particules (200 à 4 000 μ).

Dans le même temps, des expérimentations de déplacement avec mélange en écoulement saturé étaient réalisées sur d'autres matériaux comportant une distribution de pores. Rao *et al.* (1976), Sharda (1977) utilisent des agrégats de sols. Anderson et Bouma (1977), Bouma et Anderson (1977), Kanchanasut *et al.* (1978), Bouma et Wösten (1979) étudient des colonnes de sols non remaniés avec leur structure et leurs macropores naturels. Certains de leurs sols contiennent même des argiles gonflantes. Van Genuchten et Wierenga (1977), Van Genuchten *et al.* (1977) tiennent compte des phénomènes d'échanges (du tritium et du 2.4.5. T) dans des colonnes d'agrégats de sols. Enfin, Calvet *et al.* (1978) choisissent une pierre ponce.

Plusieurs modèles mathématiques ont également été proposés pour simuler l'influence d'une phase liquide stagnante (qui correspondrait à la « microporosité ») par Skopp et Warrick (1974), Van Genuchten et Wierenga (1976) Scotter (1978) ou De Smedt et Wierenga (1979). Ils pourraient être utilisés dans une étape ultérieure, pour mieux interpréter les résultats obtenus ici.

Matériel et méthode

Les agrégats poreux sont des particules de sépiolite frittée à 800 °C, de diamètre compris entre 2 et 4 mm. Ces particules sont broyées et tamisées en trois classes de diamètres : 200 à 500 μ, 500 à 1 000 μ et plus de 2 000 μ. Les diamètres moyens utilisés sont respectivement 350, 750 et 2 500 μ. Ces agrégats sont poreux et gardent leur structure même en milieu saturé en eau.

1. — *Caractéristiques de la porosité d'un empilement de particules*

Pour un matériau, une courbe de rétention de l'eau en fonction du potentiel matriciel imposé donne une image du spectre de porosité. Au prix d'hypothèses simplificatrices, Kirkham et Powers (1972) peuvent associer des potentiels et des diamètres de pores cylindriques (tabl. 1). Nous avons donc réalisé une courbe de rétention en eau, en statique et à l'humectation, pour évaluer l'importance relative des deux catégories de porosité et essayer de les situer dans une échelle de diamètres équivalents de pores.

TABLEAU 1

Potentiel capillaire et diamètre équivalent de pores
(d'après Kirkham et Powers, 1972)

Relationship between water potential and pore diameter
(from Kirkham and Powers, 1972)

Potentiel capillaire (cm d'eau)	Diamètre de pores (μ)
60	49,44
103	28,80
344	8,62
516	5,75
1 033	2,87
3 099	0,96
5 165	0,57
10 330	0,29

Hypothèses : Les pores sont cylindriques et Potentiel $= 2\,\sigma/r$. $\sigma = 72{,}75$ dyne/cm à 20 °C. r = rayon du pore.

La gamme de potentiels entre 0 et 800 cm d'eau a été étudiée par tensiomètre. Dans un bêcher, on a repéré le niveau correspondant à un volume de 50 cm³. On apporte par ailleurs, en assurant l'homogénéisation, une certaine quantité d'eau à 29,5 g du matériau sec. Ce poids de terre, réparti dans le volume de 50 cm³, permet de retrouver la densité sèche apparente des empilements étudiés, soit $da = 0{,}59$. On introduit dans ce matériau une microbougie « Soil Moisture » (tube de porcelaine, ∅ externe = 0,16 cm, longueur = 1,5 cm) reliée à un vacuographe enregistreur Fournier-Euvrard.

On attend que l'enregistrement montre que le tensiomètre est en équilibre avec le matériau. Si cette mise en équilibre nécessite le départ hors du tensiomètre d'un volume d'eau relativement important et donc susceptible de réhumecter localement la sépiolite, on utilise deux échantillons identiques. Dans le premier, le tensiomètre se vide de son eau pour arriver à un état proche de l'équilibre souhaité. On place alors la bougie dans le second échantillon où l'équilibrage final est réalisé avec un départ d'eau négligeable. La teneur en eau est déterminée par pesées.

Pour les potentiels supérieurs (en valeur absolue) à 800 cm d'eau, on a utilisé l'appareil à plaques de Richards.

Une partie de la relation entre le potentiel et la teneur en eau pour trois classes de diamètres des particules est décrite dans la figure 1. La classe de diamètres inférieurs à 200 μ montre une variation régulière de $\psi(\theta)$, qui révèle une distribution continue des tailles de pores dans la gamme étudiée. Par contre, les deux autres classes montrent une branche commune presque verticale, obtenue pour des potentiels compris entre 60 et au moins 1 000 cm d'eau (soit des diamètres équivalents de pores de 50 à au plus 3 μ). Les pores de tailles correspondant à ces succions ne sont pratiquement pas représentés dans ces empilements et par suite la teneur en eau varie très peu lorsqu'on parcourt cette gamme de potentiels. La discontinuité dans la distribution des diamètres des pores est ainsi particulièrement bien mise en évidence.

Comme on peut par ailleurs mesurer la porosité totale d'un tel empilement de particules $\left(\varepsilon = 1 - \frac{da}{dr} = 0{,}77\right)$, cette courbe (fig. 1) permet d'évaluer par différence

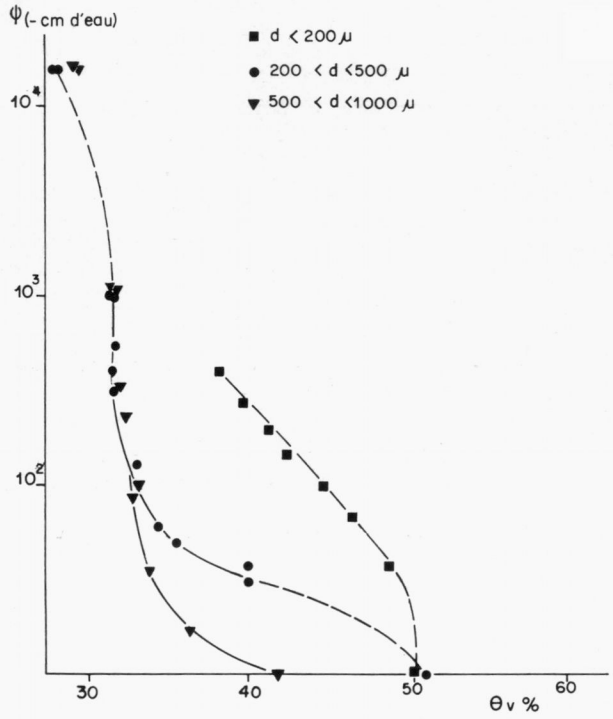


FIG. 1. — *Relation $\psi(\theta)$ à l'humectation.* Influence de la granulométrie.
Relationship between ψ and θ when wetting. Influence of aggregates mean diameter.

le volume de la macroporosité à 44 p. 100 et celui de la microporosité franche ($\psi < -10^3$ cm d'eau) à 32 p. 100 du volume total (la zone intermédiaire représente 1 p. 100 du volume total) pour les deux classes de diamètres moyens de particules 350 et 750 μ.

2. — *La dispersion hydrodynamique*

Elle est étudiée par les *courbes d'élution* obtenues en provoquant le déplacement à vitesse constante de la solution de remplissage d'une colonne d'agrégats empilés par une solution miscible différente. La colonne, en altuglass, a une longueur L = 24,8 cm et un diamètre de 3,95 cm.

La microporosité et la macroporosité ainsi définies par la courbe $\psi(\theta)$ ne sont pas exactement transposables aux phénomènes de déplacement. Il se peut par exemple que des empilements d'agrégats délimitent une cavité de taille macroscopique, mais en impasse dans le sens de l'écoulement, augmentant ainsi la phase stationnaire.

Les solutions utilisées sont :

- L'eau de la ville. En effet, une eau bipermutée se charge d'impuretés au contact du matériau et donne une solution de remplissage de concentration irrégulière, crois-

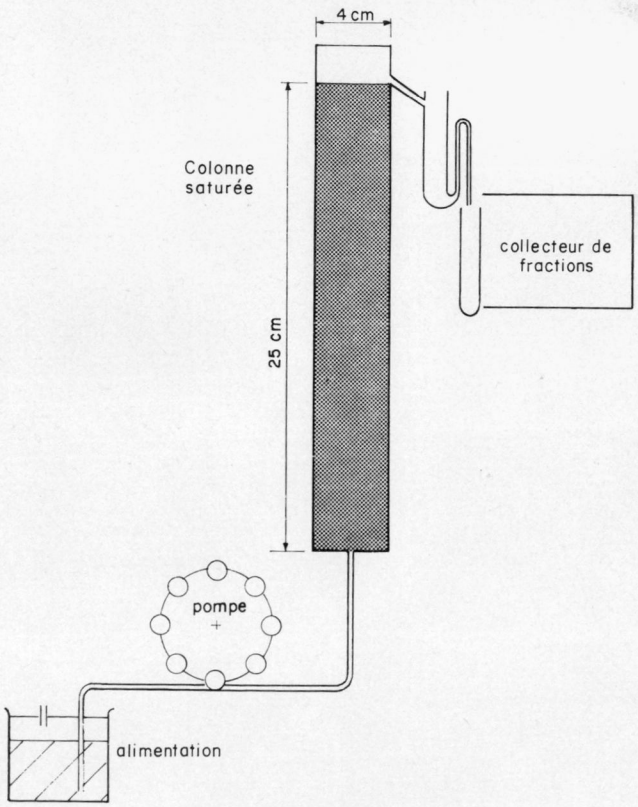


FIG. 2. — *Dispositif experimental.*
Schematic diagram of apparatus.

sant notamment avec le temps de séjour dans la colonne. Au contraire, l'eau de la ville assure un bruit de fond stable, correspondant à une lecture de 1,5 à 3 mg/l d'azote nitrique.

- Des solutions N/20 ou N/100 de nitrate de potassium.

Il faut relever que, dans aucune des manipulations relatées ici, et dont la plus longue a duré 30 jours, on n'a pu déceler d'évolution chimique ou biochimique des nitrates.

L'alimentation est assurée par une pompe électromécanique à galets Desaga. La solution saline déplaçante étant en dessous de la solution d'eau pure déplacée (fig. 2), le front de séparation des deux liquides est stable, comme Krupp l'a montré (1969).

L'effluent est recueilli par fractions de 10 cm³. Le dosage de l'azote nitrique est fait par ionométrie : électrode Orion et potentiomètre Tacussel modèle Isis 4000.

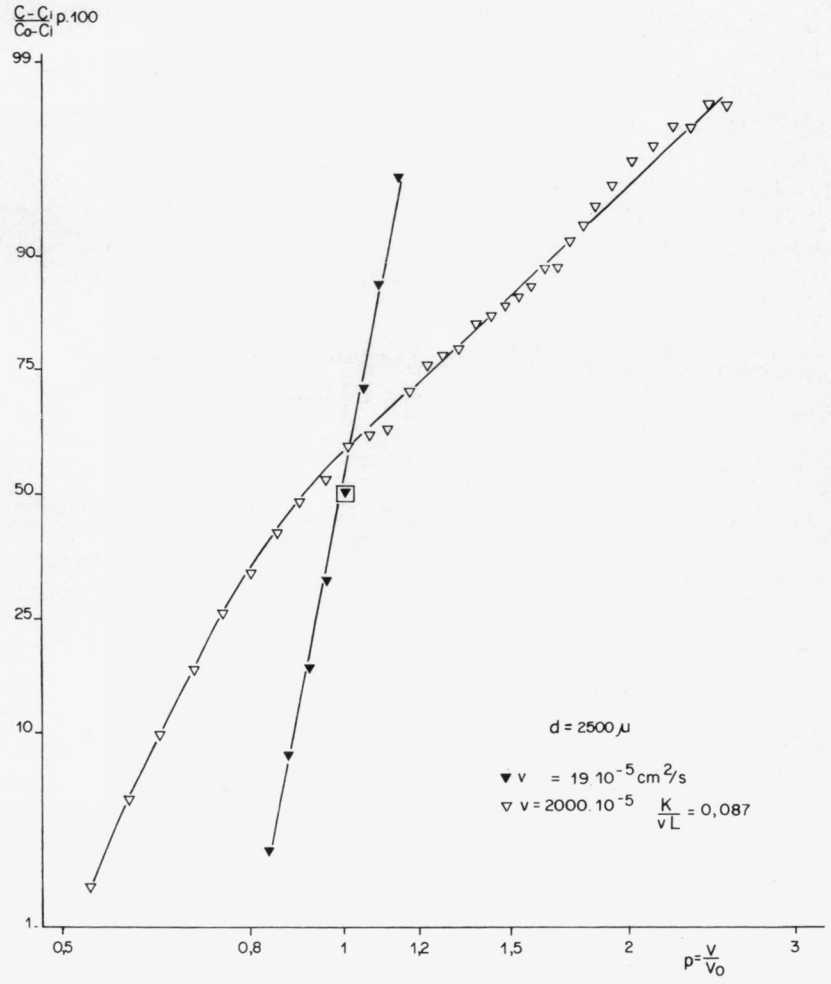


FIG. 3. — *Courbes d'élution* (d = 2 500 µ).
Breakthrough curves.

Les résultats sont présentés ainsi (fig. 3) :

- en abscisse : $\frac{V}{V_0} = p$

V = volume écoulé,
V_0 = volume total de la porosité de la colonne ;

- en ordonnée, le rapport $\frac{C - C_i}{C_0 - C_i}$

C = concentration de l'effluent,
C_i = concentration de la solution initiale déplacée,
C_0 = concentration de la solution finale déplaçante.

On trace les courbes d'élution ainsi obtenues dans un graphique galtonien (abscisse logarithmique et ordonnée gaussienne) (fig. 3). On peut alors obtenir, en particulier lorsque la condition $K/vL < 0{,}02$ est respectée (Pfannkuch, 1962), une droite passant pratiquement par le point (1 ; 1/2), comme le montre le tableau 2.

TABLEAU 2

Ecart relatif entre le volume écoulé lorsque C = Co/2 et le volume des pores calculé (Vo = volume total × porosité)
Variation between breakthrough volume when C = Co/2 and calculated pore volume

d = 350 μ		d = 750 μ		d = 2 500 μ	
10^{-2} K/vL	Ecart relatif	10^{-2} K/vL	Ecart relatif	10^{-2} K/vL	Ecart relatif
0,52	+ 6 p. 100	0,28	+ 6 p. 100	0,35	+ 8 p. 100
0,69	+ 7 p. 100	0,37	+ 9 p. 100	0,70	0
0,64	0	0,65	+ 5 p. 100	1,3	0
0,92	+ 4 p. 100	1,7	+ 6 p. 100	6,0	— 16 p. 100
1,4	+ 3 p. 100	2,4	+ 3 p. 100	8,7	— 9 p. 100
1,4	— 4 p. 100	2,65	— 4 p. 100	6.1	— 20 p. 100

La dispersion traduite par ces courbes d'élution est due à trois phénomènes qui sont :

— la dispersion hydrodynamique dans la phase liquide mobile, qui résulte elle-même de la dispersion mécanique et de la diffusion moléculaire ;

— l'échange entre les phases liquides mobile et stationnaire et la diffusion moléculaire dans la phase liquide immobile. Les équations que nous allons citer ne sont pas applicables telles quelles en toute rigueur. Elles permettent pourtant, en raison de leur simplicité, d'avancer dans la description du phénomène de dispersion. Nous les utiliserons donc en rappelant que le coefficient de dispersion K n'est qu'un coefficient apparent. Il correspond au coefficient de dispersion d'un milieu fictif, sans phase stationnaire, qui donne la même dispersion de la zone de mélange que le milieu réel étudié.

L'évolution de la concentration de l'effluent en fonction du temps peut alors être représentée par l'une des deux équations suivantes :

— *L'équation de dispersion* : $\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x_1^2}$ avec $x_1 = x - vt$

avec les conditions initiales et aux limites suivantes :

à $t = 0$

$$C(x_1, t) = C_0 \quad \text{pour} \quad x_1 < 0$$
$$C(x_1, t) = C_i \quad \text{pour} \quad x_1 \geqslant 0$$

à $t > 0$

$$\lim C(x_1, t) = C_i \quad \text{lorsque} \quad x_1 \to \infty .$$

On obtient la solution pour un milieu de longueur semi-infinie :

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \quad \text{erfc} \frac{x - vt}{\sqrt{4\,Kt}}$$

solution que l'on utilise pour une colonne de longueur $x = L$, soit si $p = \frac{V}{V_0}$:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \quad \text{erfc} \frac{1 - p}{\sqrt{\frac{4\,Kp}{vL}}} \quad \text{et} \quad K = \frac{vL}{4\,\pi S^2} \quad \text{(Kirkham, 1972)}$$

où S est la pente de la tangente à la courbe d'élution au point d'abscisse $p = 1$.

— *Ou l'équation de diffusion* (d'après Nielsen, 1962) ou encore *deuxième équation de dispersion* :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x}$$

avec les conditions initiales et aux limites suivantes :

à $t = 0$ $\quad C = C_i \quad$ pour $\quad x > 0$

à $t > 0$ $\quad \begin{cases} C = C_0 & \text{pour} \quad x = 0 \\ C = C_i & \text{si} \quad x \to \infty . \end{cases}$

La solution peut être pour un milieu de longueur semi-infinie (Lapidus, 1952) :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \frac{x - vt}{\sqrt{4\,Kt}} + \frac{vx}{K} \text{erfc} \frac{x + vt}{\sqrt{4\,Kt}} \right]$$

solution que l'on utilise pour une colonne de longueur $x = L$, soit

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \frac{1 - p}{\sqrt{\frac{4\,Kp}{vL}}} + \exp \frac{vL}{K} \text{erfc} \frac{1 + p}{\sqrt{\frac{4\,Kp}{vL}}} \right] \quad \text{(Kirkham, 1972) .}$$

On peut alors calculer K comme ce dernier auteur :

$$K = \frac{vL}{4\,\pi S^2}$$

où comme Pfannkuch (1962) :

$$K = \frac{1}{2}\sigma^2 vL \qquad \text{avec} \qquad \sigma = \frac{t_{0,84} - t_{0,16}}{2\, t_{0,50}}$$

t_i = temps pour lequel on observe la concentration $C = i.C_0$

ou encore comme Bear (1969) avec

$$\sigma = \frac{V_{0,84} - V_{0.16}}{2.V_{0,50}}$$

V_i = volume d'effluent pour lequel on observe la concentration $C = i.C_0$.

Pour nos résultats, les courbes théoriques tracées avec le coefficient K calculé selon la deuxième méthode ($K = 1/2\ \sigma^2 vL$) sont plus proches des courbes expérimentales que celles tracées à partir du coefficient K calculé par la méthode de Kirkham.

Résultats et discussion

1. — *Analyse globale des résultats*

Pour les trois classes de particules considérées on a provoqué des déplacements de solutions à différentes vitesses moyennes. Le tableau 3 donne les coefficients de

TABLEAU 3

Résultats expérimentaux : Coefficient de dispersion hydrodynamique selon la dimension des particules et la vitesse moyenne du déplacement

Relationship between dispersion coefficient and aggregates diameter or mean fluid velocity in pore space

	KNO_3 déplaçant H_2O		H_2O déplaçant KNO_3	
d μ	v 10^{-5} cm/s	K 10^{-5} cm^2/s	v 10^{-5} cm/s	K 10^{-5} cm^2/s
350	7,8	1,0	820	410
	82	14	840	470
	130	19	860	300
	860	190	890	530
	1 700	560		
	3 750	1 220		
750	3,0	0,40	890	470
	48	3,2	950	420
	58	5,3	960	760
	150	21		
	960	360		
	1 900	1 000		
	3 980	2 620		
2 500	19	1,6	1 100	1 800
	66	11	1 800	2 900
	150	47	1 900	2 900
	1 100	1 700		
	2 000	4 300		
	3 810	5 740		

dispersion (K), ainsi que les diamètres moyens d'agrégats et les vitesses de déplacement. On sait que l'analyse dimensionnelle a montré qu'il était commode de représenter dans un graphique avec des coordonnées logarithmiques l'évolution du rapport du coefficient de dispersion au coefficient de diffusion moléculaire (K/D_0) en fonction du nombre de Péclet moléculaire ($P = vd/D_0$). Pfannkuch (1962) a rassemblé dans un tel graphique, sur une même courbe, les résultats obtenus par de nombreux expérimentateurs sur des milieux constitués d'empilements de particules non poreuses et de diamètre supérieur à 300 μ.

Pour des valeurs du nombre de Péclet comprises entre environ 5 et 1 000, cette courbe de Pfannkuch est assimilable à la courbe d'équation :

$$\frac{K}{D_0} = \alpha P^m \qquad \text{avec} \qquad \alpha \simeq 0{,}5 \quad \text{et} \quad m \simeq 1{,}2 \quad \text{(Bear, 1969)} .$$

Cette courbe est une droite en coordonnées logarithmiques.

Or, la figure 4 montre que, dans le même système de coordonnées, le nuage de points formé par tous nos résultats peut être représenté par l'équation $K/D_0 = 1{,}84$

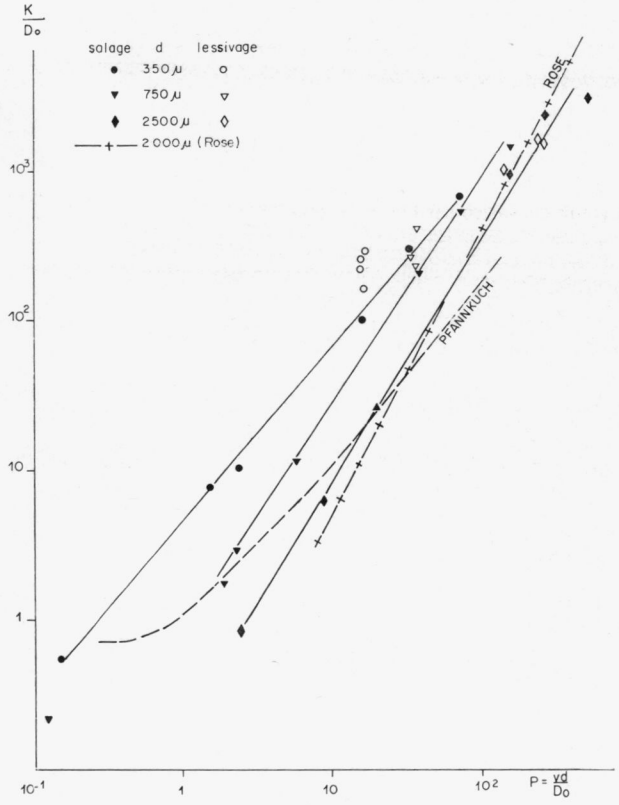


FIG. 4. — *Evolution du rapport du coefficient de dispersion au coefficient de diffusion moléculaire K/D_0, en fonction du nombre de Péclet moléculaire ($P = vd/D_0$).*

Relationship between the ratio : dispersion coefficient/molecular diffusion coefficient (K/D_0) and the Peclet number ($P = vd/D_0$).

$P^{1,23}$ ($r = 0{,}962$; $n = 19$). On retrouve donc, pour la gamme de vitesse que nous avons étudiée, une liaison *globale*, semblable à celle proposée par Pfannkuch pour des milieux de porosité plus simple.

2. — *Influence de la taille des agrégats poreux sur le coefficient de dispersion.*

Si l'on distingue maintenant, dans la même figure 4, les classes de taille des particules, on constate que les points expérimentaux correspondant à une même granulométrie sont alignés sur des droites bien distinctes. Pour des granulométries croissantes, ces segments de droite sont décalés vers les nombres de Péclet croissants et ont une pente supérieure. Les équations de ces trois droites sont rassemblées dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Régressions K et D_0 pour différents matériaux
Relationship between K and D_0 for different media

Auteur	Matériaux	d 10^{-4} cm	$K/D_0 =$	r	n
Morisot	Sépiolite	350	$4{,}50\ P^{1,16}$	0,998	6
	Sépiolite	750	$0{,}878\ P^{1,51}$	1,000	6
	Sépiolite	2 500	$0{,}200\ P^{1,62}$	0,997	6
Passioura	Sépiolite	720	$0{,}563\ P^{1,39}$	1,000	4
		1 440	$0{,}479\ P^{1,48}$	1,000	4
	Porcelaine	720	$0{,}365\ P^{1,42}$	0,999	4
		1 440	$0{,}388\ P^{1,42}$	1,000	4
	Cununurra clay	720	$0{,}481\ P^{1,31}$	1,000	4
		1 440	$0{,}395\ P^{1,40}$	0,999	5
Rose	Agrégats poreux	2 000	$0{,}063\ P^{1,90}$	d'après figure 1,	
	Agrégats pleins		$0{,}61\ P^{1,20}$	Rose (1973)	

Seule la droite obtenue avec la classe de diamètre moyen 350 μ est réellement parallèle à la courbe de Pfannkuch. Le facteur d'ajustement du nombre de Péclet (qui permet par translation horizontale de superposer les deux droites) est alors $\sigma_R = 6{,}5$ ($\sigma_R . d = 0{,}228$).

Pour les classes de diamètres moyens 750 et 2 500 μ, les pentes (représentées dans le tableau 4 par l'exposant de P) sont supérieures à 1,2. Ceci signifie qu'avec ces matériaux, le coefficient de dispersion K croît plus vite avec le nombre de Péclet (donc pour un matériau donné avec la vitesse) que le laisse prévoir la relation de Pfannkuch.

L'examen des courbes d'élution le confirme : pour des nombres de Péclet supérieurs à 2, plus le déplacement est rapide, plus la courbe d'élution est étalée (fig. 5).

Plus précisément, le mélange débute pour un volume moindre d'effluent et se termine pour un volume supérieur. Avec les plus grandes vitesses, on observe même une déformation de la courbe d'élution qui n'est plus gaussienne. L'effluent atteint une concentration relative de un demi avant que la quantité correspondant à un volume de porosité ne se soit écoulée. Par contre, comme sur la figure 3, même après le passage

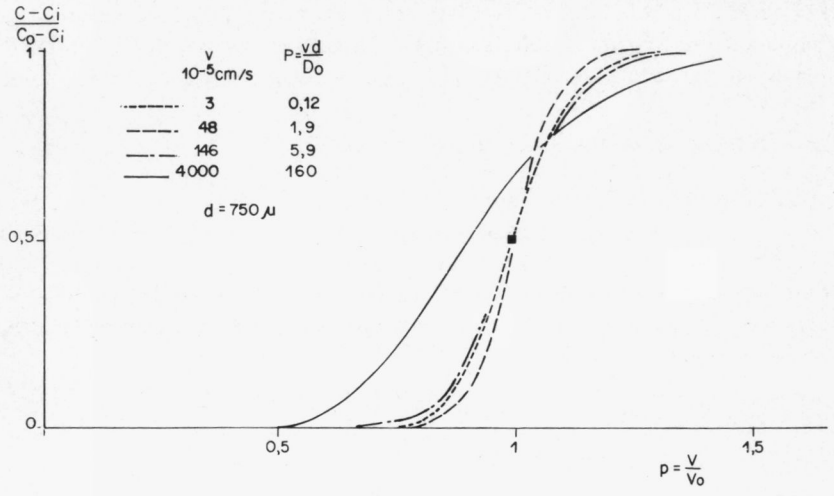


FIG. 5. — *Influence de la vitesse de déplacement sur les courbes d'élution* (d = 750 µ).
Influence of mean fluid velocity on breakthrough curves.

de deux volumes de porosité, l'effluent ne correspond toujours pas à la solution déplaçante pure. L'explication de ces deux observations peut être la suivante : lorsque la vitesse de déplacement est rapide, une partie de la solution déplaçante parvient par les plus gros pores à l'extrémité de la colonne en un temps très bref pendant lequel les échanges par diffusion n'ont pu la diluer ; le mélange commence donc pour des volumes d'effluent inférieurs. Par ailleurs, plus le déplacement est lent, plus les échanges par diffusion permettent l'homogénéisation des concentrations entre la macroporosité et la microporosité. Un même volume de solution déplaçante, puisqu'il séjourne plus longtemps dans la colonne, subit un échange plus complet avec la solution de la microporosité ; l'homogénéisation dans la colonne est réalisée avec un volume apporté moindre. On arrive ainsi à éluer la solution déplaçante pure avec un volume plus réduit à vitesse lente qu'à vitesse rapide.

De plus, cette augmentation du volume de mélange avec la vitesse moyenne est d'autant plus accentuée que le diamètre moyen des particules est grand. C'est-à-dire quand augmente l'écart entre les caractéristiques de la microporosité (qui en principe sont inchangées) et celles de la macroporosité dont le diamètre moyen croît avec la taille des particules.

On passe ainsi d'un exposant de P d'environ 1,2 pour la classe des diamètres les plus petits (qui se comporte donc comme un empilement de particules non poreuses malgré une répartition bimodale nette) à un exposant de 1,5 pour la classe intermédiaire, et à un exposant de 1,6 pour la classe des plus grands diamètres.

Par ailleurs, Passioura et Rose (1971) ont observé avec divers empilements d'agrégats poreux des résultats semblables. Nous avons joint au tableau 4 les équations des portions linéaires des courbes $K/D_0 = f(P)$, calculées à partir de leur table 2. Les pentes de ces parties linéaires (les exposants de P) sont effectivement supérieures à 1,2 et ce d'autant plus que la granulométrie est plus grossière (sauf avec la porcelaine). En fait, les différences entre les deux granulométries qu'ils ont examinées sont faibles (720 et 1 440 µ, soit du simple au double), ainsi par conséquent que les

écarts entre les pentes, et ces auteurs ont avec prudence préféré ne pas reconnaître d'influence de la taille des particules. Mais leurs résultats replacés dans la série des nôtres (obtenus avec un rapport de 7 entre les diamètres moyens extrêmes) mettent en évidence la continuité de l'augmentation de pente de la portion linéaire de la courbe $K/D_0 = f(P)$ avec le diamètre moyen des particules.

3. — *Tentative d'explication du comportement complexe des milieux de porosité bimodale*

On peut raisonnablement faire avec Passioura (1971) l'hypothèse de l'existence d'une phase liquide stationnaire dans les agrégats et d'une phase liquide mobile entre les agrégats, seule soumise à l'écoulement de masse. Les échanges entre ces deux phases seraient assurés par la diffusion moléculaire. Le coefficient de dispersion K serait alors la somme des deux composantes :

— $K_A = kv^2\, d^2/4\, D_A$ dépendant de la phase stationnaire (D_A coefficient de diffusion moléculaire à l'intérieur des agrégats, k paramètre lié à la géométrie des agrégats),

— et K_M, due à la dispersion, dans la phase mobile :

$$K = K_M \cdot \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_T} + K_A \cdot \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_T}.$$

Ce serait donc entre K_M/D_0 et $P = \dfrac{v\varepsilon_T}{\varepsilon_M} \cdot \dfrac{d}{D_0}$ que s'appliquerait la relation de Pfannkuch ; $\left(v \cdot \dfrac{\varepsilon_T}{\varepsilon_M}\right)$ est la vitesse moyenne dans la macroporosité.

Le coefficient de dispersion global K serait donc une fonction complexe de la vitesse moyenne, du type :

$$K = \beta + \frac{vd}{2} + \left(\frac{vd}{2}\right)^2.$$

Dans le même esprit, Rose (1973), utilisant plusieurs formules susceptibles de traduire la relation entre K_M et P, présente deux séries de courbes calculées pour relier K et $\dfrac{vd}{2}$, selon que les particules sont pleines ou poreuses. De ces courbes nous avons déduit les coefficients de l'équation $K/D_0 = \alpha P^m$, rapportés dans le tableau 4. Pour cet auteur également, si la pente de la partie linéaire de la courbe $K/D_0 = f(P)$ est bien de 1,2 pour les particules pleines, elle est nettement supérieure (1,9) pour les particules poreuses.

4. — *Influence de la vitesse sur la dispersion de la zone de mélange*

D'autre part, il convient de distinguer entre le coefficient de dispersion K qui croît de façon monotone avec la vitesse et la dispersion réelle des solutions traduite par le volume de mélange qui est une fonction complexe de la vitesse. En effet (fig. 5), les courbes d'élution après s'être resserrées quand le nombre de Péclet passe de 0,1 à 2, s'étalent à nouveau au-delà de 2 (chiffres valables pour la classe $d = 750\ \mu$). La dispersion (physique) passe donc par un minimum. Ceci surprendra dans la mesure où les résultats publiés avant ceux de Passioura ne montraient qu'un resserrement des courbes de dispersion quand la vitesse de déplacement augmentait. C'est que les

auteurs comparaient des situations caractérisées par des nombres de Péclet relativement faibles. Citons par exemple Nielsen et Biggar (1963, p. 12) où P varie de 0,06 à 31 et Biggar et Nielsen (1967), repris par Calvet et Graffin (1974) où P varie de 0,2 à 10.

Pourtant cette augmentation du volume de mélange avec la vitesse est prévisible : l'examen de la solution de l'équation de dispersion

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}\left[1 - \operatorname{erf}\frac{1-p}{\sqrt{4\,Kp/vL}}\right],$$

montre que pour un matériau, un fluide et une colonne donnée (p, d, D_0, L constants), l'étalement de la courbe d'élution croît avec $\sqrt{K/v}$, ou avec K/v. Or, dans les conditions où :

$$\frac{K}{D_0} = \alpha\left(\frac{vd}{D_0}\right)^m,$$

K/v devient :

$$\alpha\left(\frac{vd}{D_0}\right)^m \cdot D_0 \cdot \frac{1}{v} = (\alpha d^m D_0^{1-m})\, v^{m-1}.$$

L'étalement de la zone de mélange est alors fonction de v^{m-1}. Même avec un matériau simple respectant la liaison de Pfannkuch, les courbes d'élution obtenues à

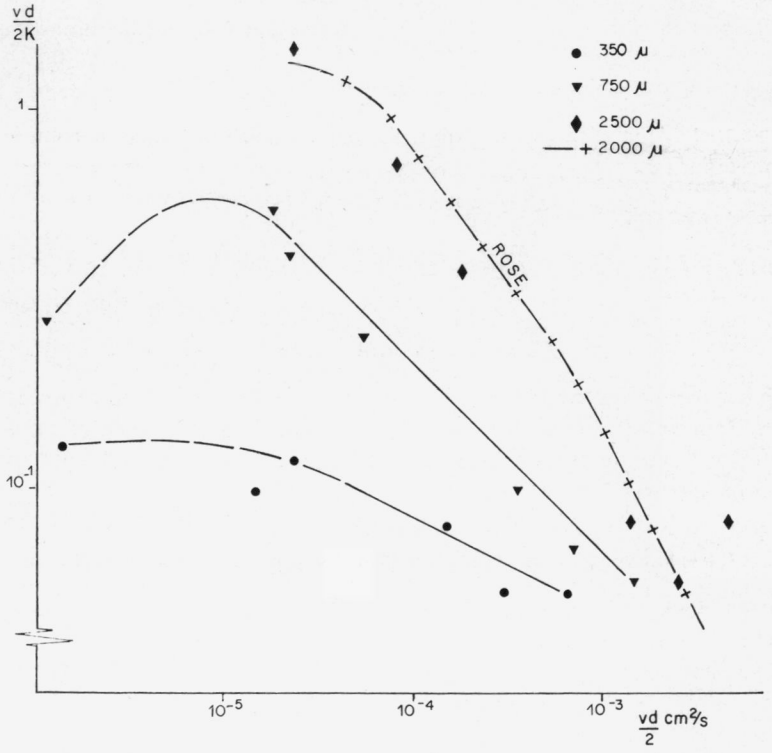


Fig. 6. — *Liaison entre le coefficient de dispersion hydrodynamique, la vitesse du déplacement et la dimension des agrégats.*

The dependance of dispersion on fluid velocity and aggregate size.

des vitesses croissantes, après s'être effectivement redressées, pour les valeurs faibles de P quand m est compris entre 0 et 1 d'après le graphique de Pfannkuch, s'étalent lorsqu'on compare des situations correspondant à des nombres de Péclet de 5 à 1 000, puisque alors m = 1,2, et $v^{m-1} = v^{0,2}$ est effectivement une fonction croissante de la vitesse.

Nous aurions pu représenter la liaison entre K/v et v que nous venons d'étudier, mais nous avons préféré reporter nos résultats sur la figure 2 de Rose (1973) qui exprime vd/2 K en fonction de vd/2 (fig. 6), plutôt que d'introduire un nouveau type de graphique. Le maximum de la courbe correspond alors au minimum de dispersion de la zone de mélange. Ce maximum a été atteint pour les granulométries de 350 et 750 μ. Pour la granulométrie la plus grossière (2 500 μ), on n'a pas pu réaliser de vitesses suffisamment faibles pour le révéler. On remarquera la coïncidence entre la courbe calculée par Rose pour des diamètres moyens de 2 000 μ et les points expérimentaux obtenus avec la classe de diamètre 2 500 μ.

Conclusion

De nos expériences de déplacement avec mélange d'une eau pure par une solution de nitrates dans un milieu de porosité bimodale, donc relativement plus complexe que ceux qui étaient généralement étudiés jusqu'à présent, nous pouvons retenir les points suivants :

1) Lorsque la condition posée par Pfannkuch, $K/vL < 0{,}02$ est respectée, l'évolution de la concentration de l'effluent d'une telle colonne peut être prévue avec efficacité même par l'équation la plus simple, l'équation de dispersion : $\partial c/\partial t = K(\partial^2 c/\partial x^2)$.

2) Le coefficient de dispersion, dans la gamme étudiée, varie avec le nombre de Péclet dans le sens observé par Pfannkuch. Mais avec nos résultats la partie linéaire de la courbe a une pente nettement supérieure à 1,2. Ceci correspond d'ailleurs aux résultats publiés par Passioura et Rose qui les expliquent en distinguant pour la solution de remplissage une phase mobile et une phase stationnaire. Cette hypothèse a déjà été reprise dans un modèle de simulation numérique par Skopp et Warrick (1974).

3) De plus, nous mettons en évidence, pour la première fois, que cette pente de la portion linéaire de la courbe $K/D_0 = f(P)$ dépend du diamètre équivalent des agrégats poreux et augmente avec lui, c'est-à-dire avec l'accentuation du caractère bimodal de la porosité.

4) Enfin, en reportant nos résultats avec les mêmes coordonnées, $vd/2\,K = f(vd/2)$, nous retrouvons expérimentalement l'allure des courbes théoriques calculées par Rose. Nous démontrons ainsi l'existence d'un minimum d'étalement du volume de mélange pour le type de matériau étudié.

Reçu pour publication en décembre 1979.

Summary

Miscible displacement of nitrate in aggregated media

Miscible displacements of water by a potassium nitrate solution were conducted at various velocities in three water saturated columns filled with porous aggregates 350, 750 and 2 500 μ in mean equivalent diameters, respectively. Except as the highest velocities, the dispersion equation $\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$

allows to predict the nitrate breakthrough curves. The dispersion coefficient K varies as does the molecular Péclet number which depends on the displacement velocity and on the mean diameter of the aggregates, in accordance with the trend already noted in unimodal porosity media. However, at a given mean diameter, dispersion increases much faster with velocity in a bimodal porosity and all the faster as the aggregate'size is greater.

These results confirm the theoretical curves of Rose (1973) and the existence of a minimum for the solute dispersion at a relatively low velocity.

Zusammenfassung

Verlagerung mit mischung der nitrate in einem stoff zweigipfliger porosität

Verlagerungen reinen Wassers durch eine Kaliumnitratlösung wurden mit verschiedenen Geschwindigkeiten, in gesättigtem Medium, und auf drei übereinander geschichteten porösen Aggregatklassen mittleren Durchmessers gleichwertig mit 350, 750, und 2 500 μ, ausgeführt.

Mit Ausnahme der grössten Geschwindigkeiten, erlaubt Streuungsgleichung

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

wirksam die Auswaschungskurven des Nitrats zu bestimmen. Der Streuungskoeffizient K ändert sich mit der molekularen Pecletzahl, die von der Verlagerungsgeschwindigkeit und dem mittleren Durchmesser des Aggregats abhängt, wie man dies schon am allgemeinen Verlauf auf Medien eingipfliger Porosität feststellte. Mit einem gegebenen mittleren Durchmesser, wächst jedoch die Streuung viel schneller mit der Geschwindigkeit in einer zweigipfligen Porosität und dies je schneller, je grösser die Abmessungen der Partikel sind.

Ausserdem bestätigen diese Ergebnisse die von Rose (1973) veröffentlichten theoretische Kurven, und das Bestehen eines Minimums für das Mischungsvolumen bei einer relativ kleinen Geschwindigkeit.

РЕЭЮМЕ

Перенос и смешивание нитратов в материале бимодальной пористости.

МОРИЭО А.

Перенос чистой воды раствором нитрата калия осуществился на разных скоростях в насыщённой среде и в трёх типах пористых агрегатов, имеющих 350,750 и 2 500 микронов в среднем эквивалентном диаметре.

за исключением самых высоких скоростей, дисиерсионное уравнение $\frac{бc}{бt} = K \frac{б^2c}{бx^2}$ даёт возможность предусматривать с большой эффективностью кривые элюирования нитратов. Дисперсионный коэффициент К колебается одновременно с массовым числом молекул ПЭКЛЕТА, зависящим от скорости переноса и от среднего диаметра агрегатов, как в случае сред одномодальной пористости. Однако, для определённого среднего диаметра, чем выше — скорость и чем крупнее — размеры частиц, тем быстрее увеличивается дисперсия в среде бимодальной пористости.

Кроме того, эти результаты подтверждают теоретические кривые РОЭА/1973/и существование минимума объёма смеси на относительно слабой скорости.

Références bibliographiques

ANDERSON J. L., BOUMA J., 1977. Water movement through pedal soils : I. Saturated flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41**, 413-418.

BEAR J., 1969. Hydrodynamic dispersion. In « *Flow through porous media* » Edited by de Wiest, Academic Press, New York, pp. 109-199.

BIGGAR J. W., NIELSEN D. R., 1960. Miscible displacement in saturated and unsaturated soils. 7th *Intern. Cong. Soil Sci.*

BIGGAR J. W., NIELSEN D. R., 1962. Miscible displacement in soils. II. Behaviour of tracers. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **26**, 125-128.

BIGGAR J. W., NIELSEN D. R., 1967. Miscible displacement and leaching phenomena. In « *Irrigation of Agricultural Lands* ». Am. Soc. of Agronomy. Madison Wis., 254-274.

BOUMA J., ANDERSON J. L., 1977. Water and chloride movement through soil columns simulating pedal soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41,** 766-770.

BOUMA J., WÖSTEN J. H. M., 1979. Flow patterns during extended saturated flow in two undisturbed swelling clay soils with different macrostructures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43,** 16-22.

CALVET R., GRAFFIN P., 1974. Description mathématique des phénomènes de transport des solutions aqueuses dans les milieux poreux. *Ann. agron.*, **25,** 123-155.

CALVET R., LE RENARD J., TOURNIER C., HUBERT A., 1978. Hydrodynamic dispersion in columns of pumice particles. *J. Soil Sci.*, **29,** 463-474.

DE SMEDT F., WIERENGA P. J., 1979. Mass transfer in porous media with immobile water. *J. Hydrol.* (à paraître).

KANCHANASUT P., SCOTTER D. R., TILLMAN R. W., 1978. Preferential solute movement through larger soil voids. II. Experiments with saturated soil. *Austr. J. Soil Res.*, **16,** 269-276.

KIRKHAM D., POWERS W. L., 1972. Miscible displacement in « *Advanced Soil physics* ». Wiley Interscience, pp. 379-427.

KRUPP H. K., ELRICK D. E., 1979. Density effects in miscible displacement experiments. *Soil Sci.*, **107,** 372-380.

KRUPP H. K., BIGGAR J. W., NIELSEN D. R., 1972. Relative flow rates of salt and water in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36,** 412-417.

LAPIDUS L., AMUNDSON N. R., 1952. Mathematics of adsorption in beds. *J. Phys. Chem.*, **56,** 984-988.

NIELSEN D. R., BIGGAR J. W., 1961. Miscible displacement in soils. I : Experimental information. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **25,** 1-5.

NIELSEN D. R, BIGGAR J. W., 1962. Miscible displacement in soils. III : Theoretical considerations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **26,** 216-221.

NIELSEN D. R., BIGGAR J. W., 1963. Miscible displacement. IV : Mixing in glass beads. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **27,** 10-13.

NIELSEN D. R., JACKSON R. D., CARY J. W., EVANS D. D., 1972. *Soil water*. Am. Soc. Agron., Soil Sci. Soc. Am., 175 p.

PASSIOURA J. B., 1971. Hydrodynamic dispersion in aggregated media. I : Theory. *Soil Sci.*, **111,** 339-344.

PASSIOURA J. B., ROSE D. R., 1971. Hydrodynamic dispersion in aggregated media. II : Effects of velocity and aggregate size. *Soil Sci.*, **111,** 345-351.

PFANNKUCH H. O., 1962. Contribution à l'étude des déplacements des fluides miscibles dans un milieu poreux. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **18,** 215-268,

RAO P. S. C., GREEN R. E., AHUJA L. R., DAVIDSON J. M., 1976. Evaluation of a capillary bundle model for describing solute dispersion in aggregated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40,** 815-820.

ROSE D. A., PASSIOURA J. B., 1971. The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion. *Soil Sci.*, **111,** 252-257.

ROSE D. A., 1973. Some aspects of the hydrodynamic dispersion of solutes in porous materials. *J. Soil Sci.*, **24,** 284-295.

SCOTTER D. R., 1978. Preferential solute movement through larger soil voids : I. Some computations using simple theory. *Austr. J. Soil Res.*, **16,** 257-267.

SHARDA A. K., 1977. Influence of soil bulk density on miscible displacement of nitrate. *Plant and Soil*, **46,** 267-270.

SKOPP J., WARRICK A. W., 1974. A two phase model for the miscible displacement of reactive solutes in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **38,** 545-550.

VAN GENUCHTEN M. Th., WIERENGA P. J., 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media : I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40,** 473-480.

VAN GENUCHTEN M. Th., WIERENGA P. J., 1977. Mass transfer studies in sorbing porous media : II. Experimental evaluation with Tritium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41,** 272-278.

VAN GENUCHTEN M. Th., WIERENGA P. J., O'CONNOR, G. A., 1977. Mass transfer studies in sorbing porous media : III. Experimental evaluation with 2, 4,5-T. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41,** 278-285.

Ann. agron., 1980, **31** (1), 19-32.

Identification des phénomènes intervenant lors du transport de solutés en solution aqueuse dans le milieu crayeux

P. VACHIER

Station de Science du Sol, I.N.R.A.,
Route de Montmirail, Fagnières, 51000 Châlons sur Marne

Résumé

L'étude comparative des résultats de l'élution du sodium et du potassium dans des colonnes de grains de craies et de calcite, saturées en eau, permet de mettre en évidence les différents phénomènes qui interviennent lors du transport de ces cations dans la craie. Les minéraux argileux contenus dans la craie apparaissent comme le facteur essentiel qui conditionne leur transport.

La maîtrise des problèmes posés par la pollution et la fertilisation ainsi que la compréhension de la pédogenèse dans le milieu crayeux (Durand, 1978) rendent nécessaire une meilleure connaissance des mécanismes intervenant lors du transport dans la craie de solutés en solution aqueuse.

Ce milieu se caractérise par sa nature chimique, 85 à 99 p. 100 de carbonate de calcium, et par la nette séparation que l'on peut faire au sein de la roche entre la porosité de fissure due principalement aux diaclases et à la porosité interne des blocs de craie.

L'étude des mécanismes de transport a été réalisée au laboratoire sur un milieu saturé en eau.

I. — Méthodes d'études et caractéristiques des matériaux

A. — *Méthodes d'études*

1. *Elutions sur colonnes.*

On étudie l'élution d'un volume v (20 ml) d'une solution de carbonate de sodium et de carbonate de potassium à la concentration $C_{iNa} = 80$ mg/l et $C_{iK} = 80$ mg/l par de l'eau saturée en carbonate de calcium sous la pression de gaz carbonique de l'atmosphère du laboratoire. La concentration de cette dernière solution en sodium et potassium sera notée C_0.

La méthode et les dispositifs expérimentaux sont les mêmes que ceux décrits par Le Renard (1977) et Le Renard *et al.* (1977).

L'éluat est recueilli en fractions de volume constant de 20 ml et analysé par spectrophotométrie d'émission de flamme.

Les conditions initiales et aux limites correspondant aux expériences sont les suivantes (écoulement mono-dimensionnel) :

$$\begin{array}{lll} t = 0 & x \geqslant 0 & C = C_0 \text{ état initial,} \\ 0 < t \leqslant t_c & x = 0 & C = C_i \text{ injection du pulse,} \\ t_c < t & x = 0 & C = C_0 \text{ élution ;} \end{array}$$

t est le temps, x l'ordonnée, prise dans la direction de l'écoulement, d'un point situé à l'intérieur de la colonne et C la concentration de la solution en ce point ; t_c est la durée du pulse.

Sur chaque matériau, six élutions successives ont été réalisées dans les mêmes conditions expérimentales. Elles sont numérotées dans l'ordre de 1 à 6.

2. *Echanges d'ions.*

Cette étude porte sur les échanges d'ions entre des solutions sodiques et potassiques et les minéraux de la craie insolubles dans l'acide chlorhydrique. Les expériences ont été réalisées à la température de 21 °C $\pm$ 1 °C.

Les solutions ont été laissées 36 h au contact des minéraux bien que des mesures de cinétiques aient indiqué que l'équilibre était atteint au bout d'une demi-heure.

Les concentrations à l'équilibre ont été déterminées sur le surnageant après centrifugation de la suspension argileuse par spectrophotométrie d'émission de flamme et par absorption atomique.

B. — *Préparation et caractéristiques des matériaux*

1. *Craies et calcite.*

L'étude a été effectuée avec trois matériaux :

— une craie sénonienne de Marson,

— une craie turonienne de Corbeil,

— de la calcite pure de Pogny.

Préparation des matériaux.

Les grains utilisés pour remplir la colonne ont un diamètre $\overline{dp}$ compris entre 2 et 1 mm. La valeur 2 mm est la limite supérieure choisie pour s'affranchir des effets de parois compte tenu du diamètre de la colonne qui est de 65 mm (Schwartz et Smith, 1953).

La valeur de 1 mm a été retenue pour limite inférieure car l'éclatement des grains de craie lors de leur imbibition rend difficile l'obtention d'une population de grains homogènes pour des valeurs plus petites du diamètre.

Les colonnes sont remplies en évitant toute sédimentation.

Les caractéristiques des craies sont données dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Matériaux de remplissage des colonnes : origines et caractéristiques physiques
Filling materials of the columns : origins and physical features

Nature	Provenance	Age géologique	Teneur en minéraux insolubles	Porosité totale	Densité apparente	Rayon des pores en Å
Craie	Marson	sénonien	1,5	0,42	1,55	3 800
Craie	Corbeil	turonien	8	0,26	1,97	1 800
Calcite	Pogny		0	0	2,7	

La densité apparente a été déterminée par voluménométrie à mercure, le rayon moyen des pores par porosimétrie à mercure (Vachier, Cambier et Prost, 1979). Le calcite provient de filons, et seuls les cristaux purs ont été utilisés. Elle ne possède pas de pores et ne renferme pas de minéraux insolubles dans l'acide chlorhydrique.

On distinguera deux fractions dans l'eau contenue dans les colonnes :

— l'eau située dans les pores intragrains (cette fraction sera désignée par ε_μ),

— l'eau située dans les pores intergrains (cette fraction sera désignée par ε_m).

Les valeurs de ε_μ et ε_m exprimées en pourcentage du volume total de la colonne sont données pour chaque colonne dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Caractéristiques des colonnes utilisées
Features of the columns used for the elution

Nature du matériau et origine	ε_m en p. 100 de V_t	ε_μ en p. 100 de V_t
Calcite, Pogny.....	43	0
Craie, Marson.....	43	24,6
Craie, Corbeil.....	45	14,2

V_t : volume total de la colonne (total volume of the column).
ε_μ : fraction d'eau intragrains (part of intraaggregates water).
ε_m : fraction d'eau intergrains (part of interaggregates water).

2. *Fraction minérale des craies insolubles dans l'acide chlorhydrique.*

Ces minéraux ont été extraits par un traitement de la craie à l'acide chlorhydrique à pH 4 environ. Les résidus ainsi obtenus ont été lavés et mis au contact de solutions de chlorure de calcium. La diffraction des rayons X permet d'identifier dans le résidu insoluble de chaque craie essentiellement des argiles qui sont de l'illite et de la kaolinite (tabl. 3). La capacité d'échange totale (CET) de la fraction argileuse de chaque craie déterminée à l'oxalate d'ammonium est de 36 meq/100 g (tabl. 3).

TABLEAU 3

Capacité d'échange totale et composition minéralogique des minéraux insolubles dans HCl

Total exchange capacity and mineralogical composition of the clayes from chalk

Echantillon	CET meq/100 g	Kaolinite	Illite	Montmorillonite	Quartz
Marson	36	+ + +	+ + +	traces	+
Corbeil	36	+ + +	+ + +	traces	traces
Pogny	00	néant	néant	néant	néant

+ + + abondant (plentiful).
+ peu abondant (few).

II. — Résultats expérimentaux

1. — *Elutions sur colonnes*

Les courbes d'élution du sodium et du potassium sont reportées respectivement sur les figures 1*a* et 1*b*.

Les concentrations relatives en « traceurs » C_{Na}/C_{iNa} et C_K/C_{iK} sont exprimées en fonction de V_0/V_p ; V_0 représente le volume de fluide écoulé au travers de la colonne au temps t et V_p est le volume des pores de la colonne ; C_{Na} et C_K sont les concentrations mesurées à la sortie de la colonne.

Lorsque les courbes d'élution sont très voisines les unes des autres pour les six expériences, une seule courbe moyenne a été reportée sur les figures.

C'est le cas des courbes d'élution du sodium dans la calcite, dans la craie de Marson et de Corbeil, et aussi des courbes d'élution du potassium dans la calcite.

Dans la craie de Corbeil, les courbes d'élution du potassium n'ont pu être tracées, le potassium ne se trouvant dans l'éluat qu'à l'état de traces.

Un certain nombre d'observations importantes sont à faire :

— les pics d'élution du sodium et du potassium sur la colonne de calcite sont très semblables pour chacune des vitesses utilisées ;

— dans la craie de Marson, les pics d'élution du sodium et du potassium sont bien séparés, la valeur maximale de C_{Na}/C_{iNa} ou de C_K/C_{iK} observée est inférieure à celle observée dans la calcite ;

— enfin, dans la craie de Corbeil, seul le pic d'élution du sodium apparaît.

2. — *Propriétés d'échange de la fraction argileuse*

Compte tenu de la ressemblance minéralogique et de la valeur de la capacité d'échange totale (CET) des deux fractions argileuses, les mesures ont été effectuées sur un mélange de celles-ci.

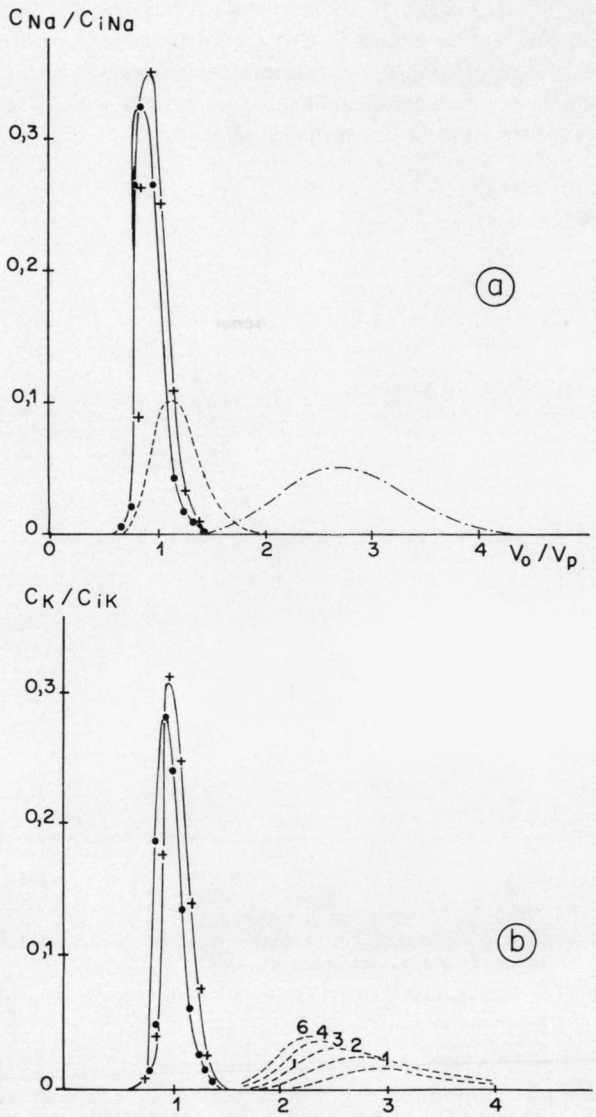


FIG. 1. — *Courbes d'élution du sodium (fig. 1a) et du potassium (fig. 1b).*
Elution curves of sodium (fig. 1a) and potassium (fig. 1b).

	$\bar{u}.10^{-4}$ cm.s^{-1} (Pore velocity)
——— • Calcite	91,45
——— + Calcite	45,72
- - - - - - Craie Marson / Marson Chalk	41
—.—.— Craie Corbeil / Corbeil Chalk	38,4

1, 2, 3, 4, 5 : numéros d'ordre de l'élution (serial numbers of the elution).

Les isothermes d'adsorption du sodium et du potassium sur la fraction argileuse calcique sont reportées sur la figure 2. Ces isothermes font apparaître une adsorption préférentielle du potassium. Pour des concentrations de la solution à l'équilibre inférieures à 3,5 méq/l (concentrations utilisées lors des élutions), l'isotherme d'adsorption du sodium peut être considérée comme linéaire.

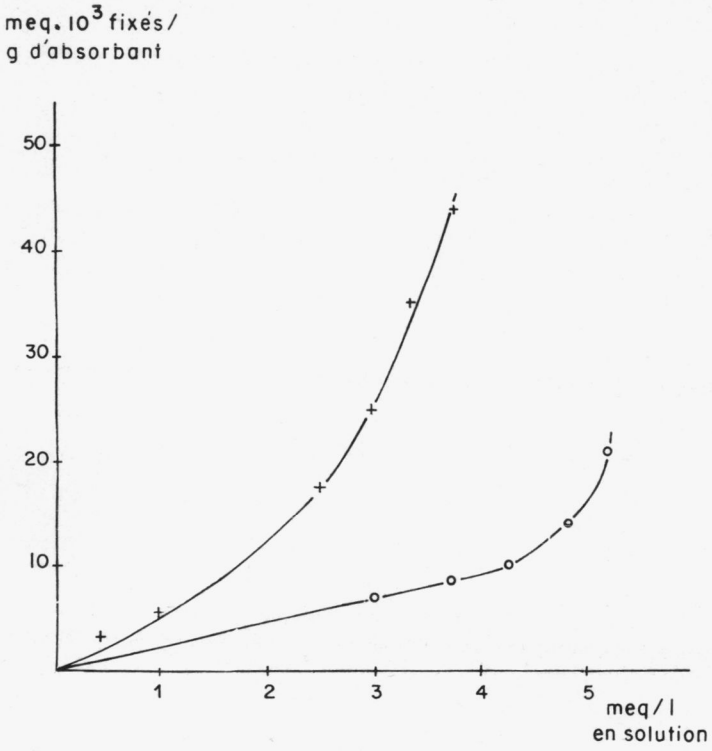


FIG. 2. — *Isotherme d'adsorption du sodium* (o) *et du potassium* (+) *sur les argiles des craies de Marson et Corbeil.*

Isotherm of sodium (o) *and potassium* (+) *adsorption on the clayes of Marson and Corbeil chalks.*

Dans le cas d'une isotherme linéaire, on a la relation Qa = KC ; Qa est la quantité de sodium fixée par unité de masse d'adsorbant et C la concentration en sodium. La valeur de K ainsi calculée est de 2,3 ml/g.

III. — Discussion et interprétation des résultats des élutions

a. — *Interprétation des caractéristiques des pics d'élution*

Cette interprétation prend en compte :

— l'aspect des pics d'élution (fig. 1*a*, 1*b*),

— le pourcentage de traceur recueilli,

— le temps de rétention moyen des solutés T_r (moment d'ordre 1 des courbes d'élution).

1. *Colonne de calcite.*

Les vitesses moyennes dans les pores utilisés dans les élutions du sodium et du potassium sont :

$$\bar{u}_1 = 45{,}72.10^{-4}\ \text{cm.s}^{-1} \quad \text{et} \quad \bar{u}_2 = 91{,}45.10^{-4}\ \text{cm.s}^{-1}\ .$$

Les temps moyens de rétention sont les mêmes que les temps d'écoulement T_0 de la phase liquide contenue dans la colonne aux vitesses moyennes $\bar{u}_i$ considérées (tabl. 4 et 5).

$$T_0 = L\bar{u}^{-1}$$

L étant la longueur de la colonne, $\bar{u}$ la vitesse de l'eau dans les pores.

La valeur $t = T_0 - T_r$ est comprise entre 0,25 p. 100 et 3 p. 100 de T_0 ; cette valeur est inférieure aux variations minimales (8 p. 100 de T_0) détectables par le dispositif expérimental utilisé.

La différence entre le temps moyen de rétention du sodium et du potassium est très faible, le sodium et le potassium se comportent donc de la même façon dans la colonne de calcite. Les pics d'élution sont pratiquement symétriques par rapport au maximum et sont centrés sur la valeur de $V_0/V_p = 1$ ou $T_r = T_0$.

TABLEAU 4

Données sur les élutions du sodium : valeurs de Dh, Kr, K et Tr
Data from the sodium elutions : values of Dh, Kr, K and Tr

Colonne	N° de l'élution	$\bar{u}.10^4$ cm.s^{-1}	Dh.10^6 cm^2.s^{-1}	$T_0 = L/\bar{u}$ s	Tr s	Kr	K_i	p. 100 de Na^+ (*) recueilli en fin d'élution
Calcite	1 à 6	45,72	540	4 374	4 363	= 0	0	100
Pogny	1 à 6	91,45	1 266	2 187	2 160	= 0	0	103
Craie	1	41	500	4 990	9 418	0,91		88
	2	40,6	—	—	9 394	0,89		94
	3	40,6	—	—	9 172	0,845		98,5
Marson	4	40,4	—	—	8 994	0,81		101
	5	40,6	—	—	9 281	0,867		102
	6	40,6	—	—	9 101	0,832		103
		valeur moyenne de Kr				0,859	0,38	
Craie	1	38,4	480	5 256	18 841	2,6		110
	2	—	—	—	18 926	2,6		105
	3	—	—	—	17 403	2,31		93
Corbeil	4	—	—	—	16 589	2,16		109
	5	—	—	—	18 124	2,45		101
	6	—	—	—	17 260	2,3		101
		valeur moyenne de Kr				2,4	2,3	

(*) Le pourcentage est calculé par rapport à la quantité totale de sodium injectée dans la colonne (as per cent total sodium injected in the column).

TABLEAU 5

Données sur les élutions du potassium : valeurs de Dh et Tr
Data from the potassium elutions : values of Dh and Tr

Colonne	N° de l'élution	$\bar{u}.10^4$ $cm.s^{-1}$	$Dh.10^6$ $cm^2.s^{-1}$	$T_0 = L/\bar{u}$ s	Tr s	p. 100 de K^+ (*) recueilli en fin d'élution
Calcite	1 à 6	45,72	640	4 374	4 443	100
Pogny	1 à 6	91,45	1 460	2 187	2 114	96
Craie	1	41	600	4 970	26 835	36
	2	40,6	—	—	25 810	60
Marson	3	40,6	—	—	22 057	75
	4	40,4	—	—	20 734	76
	5	40,6	—	—	—	—
	6	40,6	600	4 970	19 868	85
Craie Corbeil	1 à 6	38,4	580	5 256		traces permanentes

(*) Le pourcentage est calculé par rapport à la quantité totale de potassium injectée dans la colonne (as per cent total potassium injected in the column).

Dans ce cas, seule la dispersion hydrodynamique intervient pour créer une zone de mélange entre la solution de traceur et la solution d'élution.

2. *Colonnes de craie.*

Dans ce cas, nous comparerons les résultats obtenus pour un même cation sur deux colonnes, l'une contenant la craie de Marson, l'autre contenant la craie de Corbeil.

Comportement du sodium.

La quantité de traceur (Na^+) recueillie à la sortie des deux colonnes varie entre 88 p. 100 et 110 p. 100 de la quantité injectée.

Ces variations sont inférieures à la somme des erreurs résultant de l'analyse de l'éluat : (Σ erreurs = 15 p. 100 de C_i) ; on admettra donc qu'il n'y a pas rétention de sodium dans la colonne. Les pics d'élution présentent une queue et sont dissymétriques. Deux phénomènes peuvent être à l'origine de ces observations :

1. — Un échange d'ions entre l'eau mobile et l'eau immobile.
2. — L'existence d'échange d'ions entre la phase solide et la phase liquide.

Le volume poral de la colonne comprend les pores inter-agrégats dont le rayon moyen est de l'ordre du millimètre et les pores intra-agrégats dont le rayon moyen est de l'ordre de 0,1 μm (tabl. 1). En appliquant la loi de Poiseuille, on peut considérer l'eau intra-agrégat comme immobile par rapport à l'eau inter-agrégat. Des échanges d'ions peuvent donc se manifester dans le dispositif, entre l'eau contenue dans les grains de craie et l'eau située entre les grains. D'une manière générale, le temps moyen de rétention est une fonction croissante de ε_μ ; or, la comparaison des valeurs de T_r et de ε_μ (tabl. 4 et 5) obtenues pour les craies de Marson et de Corbeil montre une augmentation de T_r pour cette dernière alors que ε_μ a diminué.

Il faut donc admettre l'existence d'un autre phénomène que l'échange d'ions entre eau mobile et eau immobile au moins dans le cas de la craie de Corbeil.

Ce phénomène est l'échange d'ions entre la phase liquide et la phase solide. Le carbonate de calcium n'est pas à l'origine d'un échange d'ions entre la phase solide et la phase liquide (§ colonne de calcite), tout au moins en ce qui concerne le potassium et le sodium ; ainsi l'existence de ce phénomène doit être attribué à la fraction argileuse présente dans la craie de Corbeil.

A l'échelle de temps de l'expérience, cet échange est totalement réversible, car la totalité du sodium est recueillie dans l'éluat.

Comportement du potassium.

Dans la colonne de calcite, le potassium et le sodium se comportent de la même façon.

Dans la craie de Marson, le net décalage entre les temps moyens de rétention du sodium et du potassium (tabl. 4 et 5) ne peut pas provenir uniquement de la différence de leur coefficient de diffusion

$$(D_0(Na) = 1{,}585.10^{-5}\ cm^2.s^{-1}\ ;\quad D_0(K) = 1{,}739.10^{-5}\ cm^2.s^{-1})\ .$$

On remarque également que la quantité de potassium recueillie dans l'éluat augmente avec le nombre de percolations mais qu'elle reste inférieure à la quantité injectée. Dans ce cas, la précision d'analyse est plus grande que pour le sodium ; l'erreur faite sur la totalité des dosages est d'environ 5 p. 100 de C_i.

Enfin le temps de rétention moyen diminue avec le nombre de percolations.

Seuls des phénomènes d'échange d'ions entre la phase liquide et la phase solide peuvent expliquer ces observations. En effet, la plus grande valeur du temps moyen de rétention du potassium par rapport à celle du sodium est en accord avec la position relative des isothermes d'adsorption obtenues pour ces deux cations sur la fraction argileuse contenue dans la craie (fig. 2). Ces isothermes indiquent une sélectivité d'échange en faveur du potassium.

La diminution du temps de rétention du potassium avec l'augmentation du nombre des percolations serait due à la fixation du potassium sur les illites contenues dans la craie. Cette fixation du potassium, irréversible à l'échelle de l'expérience, bloquerait certains sites qui seraient inutilisables lors de la percolation suivante. D'autres travaux aboutissent à des conclusions analogues concernant les sites de fixation du potassium sur les illites (Assa, 1976).

La très petite quantité d'argiles, contenue dans la craie de Marson, joue donc un rôle important dans le transfert du potassium en solution aqueuse.

Dans la craie de Corbeil, le comportement du potassium qui ne ressort qu'à l'état de traces de façon permanente confirme l'existence des phénomènes suivants :

— échanges d'ions entre la phase liquide et la fraction argileuse,

— très forte rétention du potassium.

Le nombre trop faible de percolations (six) ne permet pas dans ce cas d'observer la saturation progressive des sites d'adsorption comme dans la craie de Marson.

Traitement numérique approché des résultats.

La représentation de l'écoulement d'une solution aqueuse dans un milieu poreux saturé en eau, donnée par le modèle des mélangeurs parfaits en cascade avec échange

(Villermaux, 1973), permet d'atteindre à partir d'un traitement mathématique simple des courbes d'élution, la valeur du coefficient de dispersion hydrodynamique D_h, et la valeur ρK caractéristique des échanges intervenant durant le transport.

L'utilisation de ce modèle repose sur quatre hypothèses :

1. — Elution d'un soluté très dilué dans le fluide porteur ;
2. — Coefficient de partage constant ;
3. — La colonne est représentée par une cascade de J cellules identiques en série. Les équilibres des phénomènes étudiés sont instantanés ;
4. — Seuls les phénomènes linéaires sont pris en compte.

Dans notre dispositif, les hypothèses 1 et 2 sont satisfaites. L'hypothèse 3 qui suppose des équilibres instantanés n'est pas satisfaite en ce qui concerne le potassium ; nous admettrons qu'elle l'est pour le sodium. On ne pourra donc utiliser ce modèle dans le cas où le potassium est impliqué dans des phénomènes de sorption. L'hypothèse 4 semble satisfaite si l'on se réfère à l'isotherme d'adsorption du sodium (fig. 2).

Les équations mathématiques utilisées pour décrire le fonctionnement du modèle des mélangeurs parfaits en cascade avec échange sont les suivantes :

$$T_r = T_0(1 + K_r) \tag{1}$$

$$\frac{\sigma^2}{T_r^2} = \frac{1}{J} + \frac{2\,K_r}{(1 + K_r)^2} \times \frac{t_m}{T_0} \tag{2}$$

avec

$$\frac{1}{J} = \frac{2}{\bar{u}L}(D_0 + D_m) = \frac{2\,D_h}{\bar{u}L}$$

et

$$K_r = \frac{(1 - \rho K) + \rho K(1 - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m}$$

σ^2 est le moment centré d'ordre 2 de la courbe ou variance,
K_r facteur de rétention,
t_m est la somme des temps caractéristiques des transferts,
D_m coefficient de dispersion mécanique,
J nombre de cellules en cascade, J représente la dispersion hydrodynamique.

Calcul de D_h.

Dans le cas de la colonne de calcite, T_r est égal à T_0 pour les deux cations.
De l'équation (1) on déduit $K_r = 0$ et l'équation (2) devient

$$D_h = \frac{\sigma^2\,\bar{u}L}{2\,T_r^2}$$

Les valeurs de D_h ainsi obtenues pour le sodium et le potassium sont reportées dans le tableau 6 en fonction des vitesses de percolation utilisées.

Les points expérimentaux Log D_h/D_0 en fonction de Log $\bar{u}\,d\bar{p}/D_0$ se placent de façon satisfaisante par rapport à la courbe proposée par Perkins et Johnston à partir de leurs résultats expérimentaux (fig. 3).

TABLEAU 6

Valeurs du coefficient de dispersion hydrodynamique Dh en fonction de $\bar{u}$ pour les élutions du sodium et du potassium

Values of the hydrodynamic dispersion coefficient Dh in function of $\bar{u}$ for the sodium and potassium elutions

Vitesse moyenne dans les pores $\bar{u}.10^4$ cm.s^{-1}	Nature de l'ion élué	Valeur de Dh.10^6 cm^2.s^{-1}
45,72	Na^+	540
	K^+	640
91,45	Na^+	1 266
	K^+	1 460

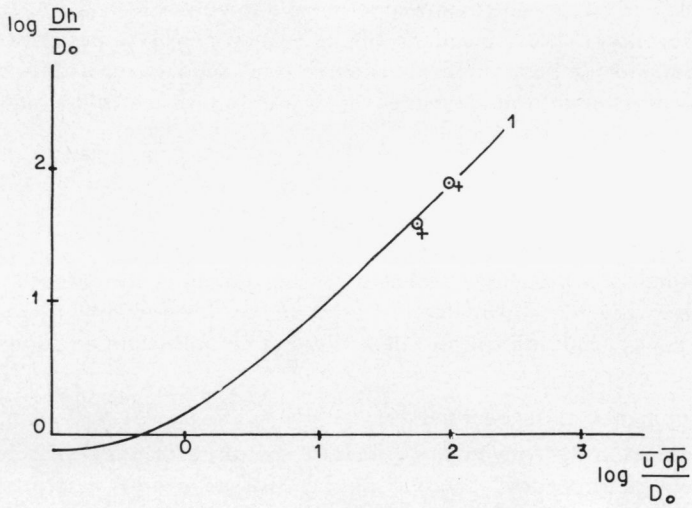


FIG. 3. — *Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques de* log (Dh/D_0) *en fonction de* log $(\bar{u}.\overline{dp}/D_0)$.

Comparison of experimental and theoritical values of log (Dh/D_0) *in function to* log $(\bar{u}.\overline{dp}/D_0)$.

1 : Courbe obtenue par Perkins et Johnston
Perkins and Johnston's curve

+ : points expérimentaux (élutions du sodium)
experimental values (sodium elutions)

⊙ : points expérimentaux (élution du potassium)
experimental values (potassium elutions).

Calcul de ρK.

Compte tenu des hypothèses de fonctionnement du modèle, le calcul de la valeur ρK n'est possible que pour le sodium dans le cas des élutions dans les craies de Marson et de Corbeil.

L'existence d'échanges entre l'eau mobile et l'eau immobile a été mise en évidence par comparaison des courbes d'élution obtenues sur les différents matériaux. Si cet échange existe seul, alors K_r est égal au rapport $\varepsilon_\mu/\varepsilon_m$.

La valeur de $\varepsilon_\mu/\varepsilon_m$ dans la craie de Marson (0,572) est différente de K_r (0,859) ; ceci confirme l'existence d'échange d'ions entre la phase liquide et la phase solide dans cette craie.

Donc dans la craie de Marson comme dans la craie de Corbeil, la fraction argileuse joue un rôle lors du transport du sodium.

Cet échange est caractérisé par la valeur K_i qui a été calculée à partir de la valeur moyenne de K_r obtenue lors des élutions du sodium pour chaque colonne de craie (tabl. 4 et 5). Les valeurs de K_i ainsi calculées pour les craies de Marson et de Corbeil sont respectivement $K_1 = 0{,}140$ et $K_2 = 0{,}849$.

Ainsi la valeur K_i pour chaque échantillon de craie peut s'exprimer en fonction de la teneur pondérale en argile (X) de la craie considérée :

$$K_i = K'.X \qquad \text{avec} \qquad K' = 10\,.$$

Cette valeur K' apparaît comme supérieure à la valeur $K = 2{,}3$ déduite de l'isotherme d'adsorption (fig. 3) du sodium sur la fraction argileuse des craies. Ceci peut être la conséquence de l'attaque acide réalisée pour séparer les argiles de la calcite des craies. Cette attaque a pu dégrader les argiles et ainsi entraîner une diminution de leur capacité d'échange totale.

Conclusions

Par comparaison d'élutions réalisées sur des colonnes de différents matériaux poreux présentant la même granulométrie, il a été possible d'identifier les phénomènes qui interviennent durant le transport de sodium et de potassium en solution aqueuse dans le milieu crayeux saturé en eau.

Les phénomènes ainsi identifiés sont :

— la dispersion hydrodynamique dans le cas de la colonne de calcite, dont le fonctionnement se rapproche de celui d'un massif de grains sphériques en verre (Tournier, 1977),

— l'existence d'échange d'ions entre la phase solide et la phase liquide. Les argiles contenues dans les craies sont à l'origine de cet échange.

Pour le sodium

— La simple comparaison des courbes d'élutions obtenues sur la craie de Marson et de Corbeil fait apparaître cet échange dans la craie de Corbeil.

— Dans le cas de la craie de Marson, un traitement mathématique simple des courbes d'élution par l'intermédiaire du modèle des mélangeurs parfaits en cascade avec échange confirme l'existence de cet échange d'ions.

Pour le potassium

— L'allure des courbes, l'augmentation de la quantité de potassium recueilli avec le nombre d'élutions et la diminution concomittante du temps moyen de rétention

ne laisse aucun doute sur l'existence de cet échange dans la craie de Marson, *a fortiori* dans la craie de Corbeil qui contient plus d'argile.

La faible quantité d'argile contenue dans les craies a un rôle essentiel sur la dynamique des traceurs injectés dans ces milieux poreux.

Toute simulation d'écoulement de solutés dans la craie devra donc avant tout tenir compte de l'existence ou non d'échanges d'ions entre la phase liquide et la fraction argileuse de la craie. Sur le plan pratique, la possibilité de fixation d'un élément polluant sur les argiles de la craie devrait être retenue comme un des critères déterminant du choix de son lieu d'épandage.

Reçu pour publication en décembre 1979.

Summary

Identification of the phenomena occurring during the transfer of aqueous-solution solutes in a chalky medium

Comparing the results of both sodium and potassium elution in water-logged columns of chalk and calcite grains, highlights the phenomena occurring on transfer of these cations into the chalk.

The elution curves (fig. 1*a*, 1*b*) show that the behaviour of both cations is the same in pure calcite. In the Marson Senonian chalk the potassium is eluted much slower than the sodium and the amount of potassium from the column increases with the serial number of the elution. In the Corbeil Turonian chalk, only the sodium emerges from the column. In these three columns two parameters only change : intragrain porosity and the clay content of the materials.

These results show that it is chiefly the clay content of the chalks that determine the behaviour of the sodium and potassium within the columns.

Zusammenfassung

Identifizierung der sich vollziehenden erscheinungen beim durchgang von Auflösungen in wässriger lösung durch ein kreidiges medium

Der Vergleich der Auswaschungsergebnisse von Natrium und Kalium durch Kreide- und Kalzitkörner enthaltende Wassergesättigte Säulen erlaubt die verschiedenen Erscheinungen, die beim Durchgang dieser Kationen durch die Kreide auftreten, ins Licht zu stellen.

Die Auswaschungskurven (Bild 1*a*, 1*b*) lassen das identische Verhalten beider Kationen in reinem Kalzit, zum Vorschein kommen. In der senonnesischen Kreide aus Marson, wird das Kalium viel langsamer ausgewaschen als das Natrium und die aus der Säule austretende Kaliummenge steigt in der Folge der Auswaschungsnummern. Mit turonnesischer Kreide aus Corbeil, tritt schliesslich nur das Natrium aus der Säule. In diesen drei Säulen verändern sich nur zwei Parameter : die zwischenkörnige Porosität und der Tongehalt der Stoffe.

Von diesen Ergebnissen ausgehend wird gezeigt, dass vor allem der Tongehalt der Kreiden das Verhalten des Natriums und des Kaliums in den Säulen bedingt.

РЕЭЮМЕ

Установление явлений, учавствующих в переносе воднорастворимых веществ в меловой среде.

ВАШИЕ П.

Сравнение результатов элюирования натрия и калия в насыщённых водой колонках с вёрнами мела и кальцита показывает разные явления, учавствующие в переносе этих катионов в мелу.

Кривые элюирования/фиг. 1а, 1б/показывают одинаковое поведение обоих катионов в чистом кальците.

В сенонском мелу из Марсона калий вымывается медленнее чем натрий количество калия, выходящее из колонки, увеличивается вместе с порядковым номером элюирования. Наконец, в туронском мелу из Корбея, один натрий выходит из колонки.Вэтих трёхколонках меняются только два параметра : внутренняя пористость зерна и содержание глины в материале.

Результаты показывают что, в основном, содержание глины в мелу определяет поведение натрия и калия в колонках.

Références bibliographiques

ASSA A. D., 1976. Phénomène de sélectivité d'échange cationique dans certains minéraux argileux. 1. — La sélectivité du potassium dans un système potassium-calcium. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, **14** (3), 219-226. 2. — Les sites d'adsorption du potassium. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, **14** (4), 279-286.

DURAND R., 1978. *La pédogenèse en pays de craie, dans le Nord-Est de la France.* Thèse Doctorat ès Sciences Strasbourg ronéo, 176 p.

LE RENARD J., 1977. Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau. I. Aspects méthodologiques. *Ann. agron.*, **28** (6), 651-660.

LE RENARD J., CALVET R., TOURNIER C., HUBERT A., 1977. Etude du phénomène de dispersion hydrodynamique dans un milieu poreux saturé. Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal. *Ann. agron.*, **28** (4), 47-64.

PERKINS T. K., JOHNSTON O. C., 1963. A review of diffusion and dispersion in porous media. *Trans. AIME*, **228,** 70-84.

SCHWARTZ C. E., SMITH J. M., 1953. Flow distribution in packed beds. *Ind. Engin. Chem.*, **45** (6), 1209-1218.

TOURNIER C., 1977. *Etudes du transport de molécules herbicides dans des milieux poreux saturés en eau.* Thèse 3e cycle. Paris-Sud Orsay ronéo, 76 p.

VACHIER P., CAMBIER P., PROST R., 1979. Structure d'un milieu poreux : La craie. *Ann. agron.*, **30** (3), 247-263.

VILLERMAUX J., 1973. Relations entre la forme des pics chromatographiques et les paramètres physiques et opératoires de la colonne. *J. Chromatogr.*, **83,** 205-222.

Ann. agron., 1980, **31** (1), 33-62.

Mise au point bibliographique

Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants

I. — Description du phénomène d'adsorption

R. CALVET *, Martine TERCÉ * et J. C. ARVIEU **

* *Station de Science du Sol,*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 Versailles

** *Station d'agronomie et de Physiologie végétale*
Centre de Recherches d'Antibes, I.N.R.A.,
06602 Antibes

Résumé

L'adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants concerne les interfaces gaz-solide et liquide-solide. Les isothermes d'adsorption des produits gazeux font l'objet de descriptions basées sur des théories physiques : formulation de Langmuir, de Brunauer, Emmett et Teller et de Freundlich. L'adsorption à partir des solutions n'a pas fait l'objet de développements aussi détaillés et une description générale de cette situation doit prendre en compte les échanges moléculaires entre le soluté et le solvant. Du fait des faibles concentrations des pesticides en solution, ces échanges peuvent cependant être négligés pour la description des isothermes d'adsorption. Une formulation du type Langmuir avec des constantes dépendantes de la concentration permet de décrire tous les cas possibles. Avec des solutions diluées, cette formulation se réduit à une expression semblable à la relation de Freundlich. Son emploi est très fréquent mais l'attention doit être attirée sur le fait qu'il ne s'agit que d'une simple description numérique. Les théories de l'échange d'ions conviennent pour les molécules pesticides ionisées mais leur utilisation a été très limitée.

La thermodynamique de l'adsorption des gaz est plus simple que celle de l'adsorption des produits en solution. Dans ce cas, une description rigoureuse doit tenir compte de l'existence éventuelle d'un échange entre les molécules de soluté et les molécules de solvant. Ceci explique que les valeurs expérimentales des enthalpies soient difficiles à interpréter. L'application de la loi de Van T'Hoff à la constante d'équilibre a une valeur générale. Son application à un coefficient de distribution est valable à condition qu'il n'y ait pas d'échange et que l'isotherme d'adsorption soit linéaire.

Les travaux relatifs à la cinétique de l'adsorption des pesticides sont assez peu nombreux. Deux types de formulations sont le plus souvent utilisés. Le premier exprime l'existence d'une proportionnalité entre la vitesse d'adsorption et le nombre de sites inoccupés, le second, plus complet tient compte de la désorption.

Les liaisons entre les molécules pesticides et la surface des adsorbants peuvent être très variées : liaisons ioniques, charge-dipôle, dipôle-dipôle, liaison hydrogène et liaison de Van der Waals. Dans le cas de matériaux adsorbants purs la spectroscopie d'absorption infra-rouge peut parfois permettre d'identifier des interactions. D'une façon générale, leur étude est difficile en raison de l'existence simultanée de plusieurs types de liaison.

Introduction

La dynamique des pesticides dans le sol est le résultat de l'intervention de plusieurs groupes de phénomènes responsables de l'immobilisation, de la mise en solution, du transport et des transformations chimiques des molécules. La figure 1 représente schématiquement les relations existant entre ces phénomènes.

Les caractéristiques physiques et chimiques de la solution du sol conditionnent en grande partie l'activité biocide des pesticides et leur comportement comme agents de pollution. Parmi celles-ci, la quantité de produit en solution dans le sol est particulièrement déterminante, de telle sorte que tous les facteurs susceptibles de la faire varier jouent un rôle dans la dynamique des pesticides. De ce point de vue, les phénomènes d'adsorption et de désorption sont parmi les facteurs les plus importants.

L'adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants a fait l'objet d'un très grand nombre de travaux (Goring, Hamaker, 1972 ; Guenzi, 1974 ; Kearney, Kaufman, 1975). Un chercheur ou un technicien peu informé pourrait en conclure qu'il s'agit là d'un sujet bien connu où tout est clairement décrit. La réalité est cependant légèrement différente car une abondance de travaux ne signifie pas nécessairement une abondance de connaissances. La recherche de la description et de l'explication relative à l'adsorption de tel ou tel pesticide par un adsorbant donné n'est pas toujours facile en raison des contradictions présentées par les résultats publiés et de l'usage d'un langage scientifique peu précis. Dans ces conditions, il n'est souvent pas possible de dégager les acquis importants. Bien qu'ils existent, ils se trouvent noyés dans une masse d'observations et de commentaires où ils n'apparaissent pas d'une façon très évidente. Cet état de choses a deux conséquences. La première est que les limites de notre connaissance ne sont pas bien définies ; la deuxième est qu'un certain nombre d'idées fausses ou pour le moins très contestables se sont transmises d'une publication à l'autre.

Compte tenu de cette brève analyse de la situation actuelle, le travail bibliographique qui suit se propose d'atteindre trois objectifs :

— Exposer le plus simplement possible les différentes notions physico-chimiques relatives aux phénomènes d'adsorption des pesticides.

— Dégager les connaissances essentielles pouvant constituer un acquis certain.

— Faire une analyse critique de ces connaissances.

Cette bibliographie concerne l'adsorption par les sols et leurs constituants. Il est en effet important de regrouper les informations relatives à ces deux types de matériaux car elles ne se situent pas au même niveau. Les données sur l'adsorption par les sols ont un caractère global qui les rend souvent directement utilisables dans l'étude de problèmes généraux tels que les relations entre le comportement physico-chimique des pesticides et leur activité biologique ou leur transport dans les sols. Les données sur l'adsorption par les constituants du sol permettent, par contre, d'obtenir des éléments utiles à la description et à l'explication des mécanismes. Ces deux ensembles de données correspondent donc à des objectifs différents mais sont complémentaires et ne doivent donc pas être exclusifs l'un de l'autre.

Cette mise au point comprend cinq parties faisant chacune l'objet d'une publication séparée :

I. — Description du phénomène d'adsorption.

II. — Les facteurs déterminant l'adsorption.

III. — Caractéristiques générales de l'adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants.

IV. — Conséquences du phénomène d'adsorption.

V. — Les méthodes d'étude de l'adsorption.

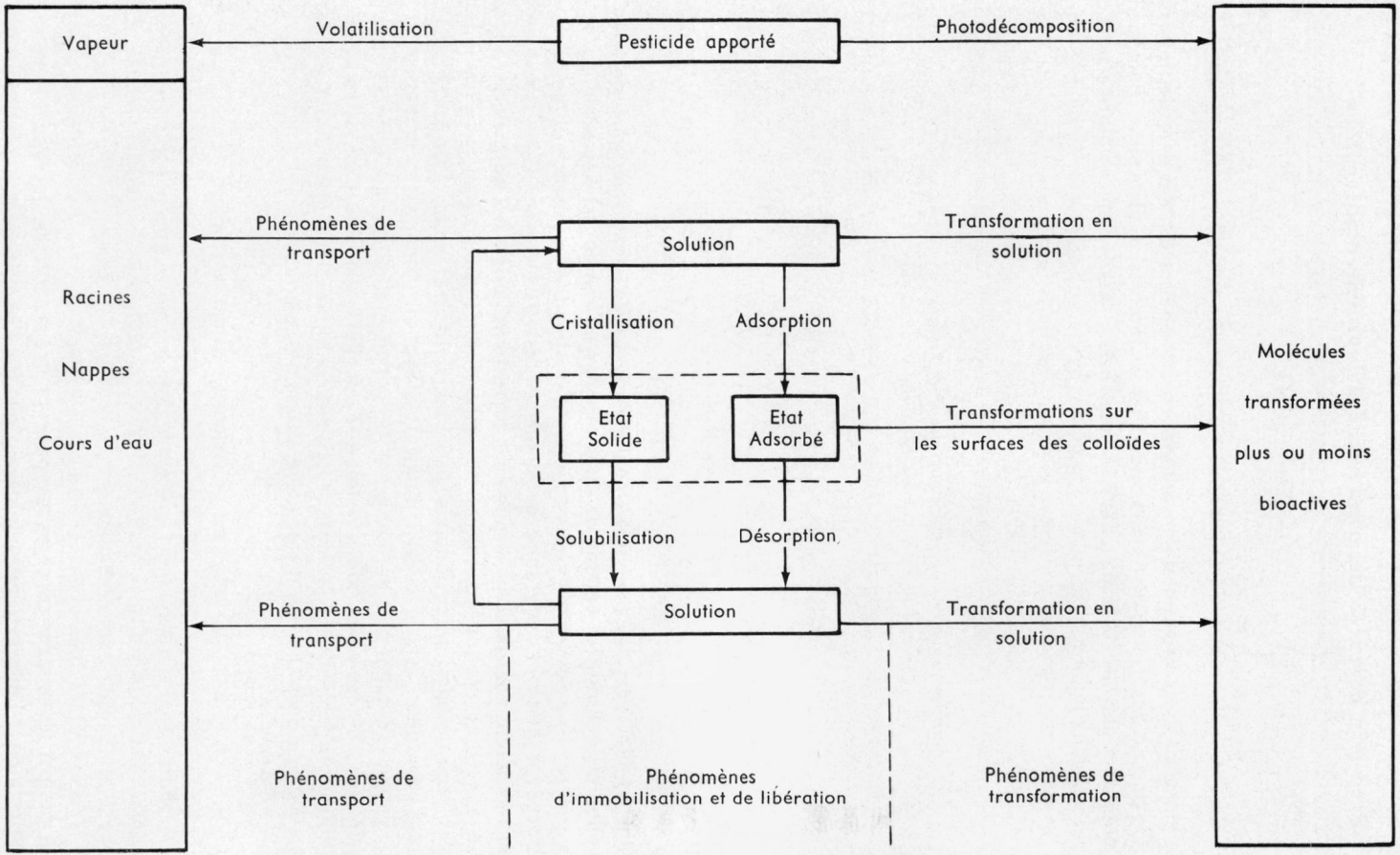


FIG. 1. — *Représentation schématique de la dynamique des pesticides dans le sol*
Schematic diagram of the dynamic of pesticides in the soil.

Première partie — Description du phénomène d'adsorption

I. — Généralités

A. — *Adsorption physique et adsorption chimique*

Les phénomènes d'adsorption peuvent être classés en fonction des énergies mises en jeu. On parle d'adsorption physique quand elles sont faibles, d'adsorption chimique quand elles sont élevées. 10 kcal mole^{-1} est une valeur généralement utilisée pour distinguer ces deux types d'adsorption bien qu'il n'existe pas entre eux de limite bien définie. Leurs caractéristiques générales sont données dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Caractéristiques de l'adsorption physique et de l'adsorption chimique
Characteristics of physical and chemical adsorption

	Adsorption physique	Adsorption chimique
Energie mise en jeu.....	10 kcal mole^{-1}	10 kcal mole^{-1}
Effet d'une augmentation de la température	diminue	augmente
Adsorption.....	non spécifique	spécifique

L'état du film adsorbé peut également permettre de classer les phénomènes d'adsorption en utilisant les notions de films mobiles et immobiles. Les premiers se caractérisent par une adsorption non localisée : la probabilité de passage d'une molécule adsorbée d'un point à un autre de la surface est très élevée. Cette situation implique une faible énergie d'adsorption et correspond donc à l'adsorption physique. Le terme d'adsorption localisée est par contre utilisé pour caractériser les films immobiles pour lesquels la probabilité précédente est très faible. Dans ce cas, l'énergie d'adsorption est élevée et il s'agit d'adsorption chimique. Il faut toutefois faire une restriction quant à ce dernier point. Il peut en effet exister des surfaces où la densité des sites d'adsorption soit très faible et où l'énergie d'adsorption soit peu élevée (liaisons hydrogène par exemple). Dans ces conditions, les molécules adsorbées peuvent être localisées sans qu'il s'agisse d'adsorption chimique.

B. — *Les différents types de systèmes existant dans le sol*

Trois phases sont généralement présentes dans un sol : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. Il en résulte trois types d'interface possibles : solide-gaz ; liquide-gaz ; solide-liquide.

Ces trois interfaces doivent être pris en considération dans les études d'adsorption des pesticides par les sols, car ces composés peuvent être des solides, des liquides ou des gaz. L'adsorption à l'interface gaz-liquide n'a pas fait l'objet d'un grand nombre de

publications et à notre connaissance il n'existe pas de travaux concernant les pesticides. Dans ces conditions, nous n'en parlerons pas, mais il faut toutefois remarquer que ce phénomène peut avoir une certaine importance. Il précède le phénomène de dissolution des produits gazeux et peut éventuellement jouer un rôle non négligeable dans les phénomènes de transport des pesticides par les films d'eau, surtout dans les sols non saturés et pour les composés très peu solubles.

II. — Isothermes d'adsorption

A. — *Adsorption à l'interface gaz-solide*

Ce type d'adsorption se rencontre soit avec les pesticides gazeux tels que le bromure de méthyle et le dibromure d'éthyle, soit avec les pesticides non gazeux dont la tension de vapeur est élevée comme le DDT et la trifluraline par exemple.

De nombreux ouvrages ont été consacrés à ce phénomène (De Bœr, 1953 ; Kipling, 1965 ; Fripiat *et al.*, 1971) et nous ne ferons que rappeler les aspects essentiels des développements proposés pour décrire les isothermes d'adsorption.

1. *Adsorption physique.*

a) *Théorie de Langmuir.*

Partant de considérations cinétiques, Langmuir a été amené à proposer une formulation de l'isotherme d'adsorption basée sur les hypothèses suivantes :

- la quantité de gaz adsorbée correspond à une couche monomoléculaire. Le nombre de sites d'adsorption est donc limité ;
- la probabilité d'évaporation d'une molécule dépend uniquement des forces exercées par la surface et non des interactions latérales ; elle est fonction du degré de recouvrement θ ;
- pour être adsorbée, une molécule doit heurter une surface nue. Ceci implique que les forces d'attraction de la surface n'ont pas d'effet au-delà d'une couche de molécules. Il est alors possible d'écrire que la vitesse de condensation est proportionnelle à $(1 - \theta)$ et à la pression P.

L'écriture de l'égalité entre la vitesse d'évaporation et la vitesse de condensation conduit à la formule :

$$\theta = \frac{bP}{a + bP} \qquad (1)$$

où a et b sont des constantes.

b) *Théorie de Brunauer, Emmett et Teller (B. E. T.).*

Elle a comme point de départ la théorie de Langmuir (Fripiat *et al.*, 1971) mais concerne l'adsorption en couches multimoléculaires en l'absence de condensation capillaire. Elle repose sur trois hypothèses :

- il existe un équilibre entre l'évaporation et la condensation au niveau des différentes couches ;
- la vitesse de condensation est directement proportionnelle à P ;
- l'énergie d'adsorption de la première couche adsorbée (E_1) est différente de celle des autres couches qui est égale à l'énergie de liquéfaction (E_L).

L'équation de l'isotherme qui en résulte s'écrit :

$$\frac{\frac{P}{P_0}}{V\left(1-\frac{P}{P_0}\right)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} - \frac{P}{P_0}$$

où :

V = volume de gaz adsorbé,

V_m = volume de gaz correspondant à un recouvrement monomoléculaire,

P_0 = pression de vapeur saturante,

$C = g \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right)$; g = constante.

Dans le cas où une seule couche de molécules est adsorbée, l'expression de l'isotherme devient :

$$\theta = \frac{V}{V_m} = \frac{C\frac{P}{P_0}}{1 + C\frac{P}{P_0}}.$$

Cette relation est identique à (1).

La théorie de B. E. T. a été appliquée avec succès à l'étude de l'adsorption du dibromoéthane par des sols (Jurinak, Volman, 1957).

c) *Isotherme de Freundlich.*

Partant d'observations expérimentales, Freundlich avait constaté que les isothermes d'adsorption pouvaient être décrites par une formule empirique du type :

$$Q = K_f P^{n_f} \qquad (2)$$

où Q = quantité adsorbée par unité de masse de l'adsorbant,

K_f et n_f = constantes ; $n_f < 1$.

d) *Adsorption avec condensation capillaire.*

L'adsorption peut être suivie par un phénomène de condensation capillaire quand elle a lieu dans un corps poreux. Ceci n'est possible que si la pression partielle du gaz est suffisamment élevée, ce qui peut se produire dans les quelques cas particuliers de pesticides utilisés à l'état liquide (dichloropropène, dibromoéthane).

2. *Adsorption chimique.*

Rappelons qu'elle met en jeu des énergies élevées et qu'elle concerne une adsorption localisée. Les expressions des isothermes d'adsorption diffèrent selon la nature de la surface.

a) *Surfaces homogènes.*

Quand l'énergie d'adsorption est indépendante du taux de recouvrement, que l'adsorption est non dissociative et qu'il n'y a pas d'interactions latérales entre les molécules adsorbées, l'isotherme est décrite par la formule de Langmuir (1).

L'introduction des interactions entre les molécules conduit à tenir compte des variations d'énergie d'adsorption en fonction du taux de recouvrement θ. C'est alors l'isotherme de Temkin qu'il convient d'utiliser pour décrire l'adsorption.

b) *Surfaces hétérogènes.*

L'adsorption sur de telles surfaces peut être décrite à l'aide de la relation de Freundlich. Elle peut être déduite de l'isotherme de Langmuir en supposant que la surface de l'adsorbant peut être assimilée à un ensemble d'éléments de surface caractérisés chacun par une énergie d'adsorption différente mais très supérieure à l'énergie correspondant à l'agitation thermique (RT) (Fripiat *et al.*, 1971).

B. — *Adsorption à l'interface solide-liquide*

1. *Description générale.*

Dans le cas de l'adsorption à partir de solutions ou de mélanges gazeux, la phase solide est toujours en contact avec au moins deux composants partiellement ou complètement miscibles. Il existe donc une différence fondamentale avec le système gaz-solide précédemment étudié. Dans celui-ci en effet, le gaz considéré ne contient qu'une espèce de molécules alors qu'avec les solutions, il faut tenir compte de tous les composants. Ce fait n'a malheureusement pas été toujours souligné pour l'adsorption des pesticides. C'est la raison pour laquelle il nous a semblé utile de développer cet aspect en reprenant les descriptions données par Kipling (1965).

L'étude expérimentale de l'adsorption repose sur la mesure des variations de concentrations en un composant de la solution au contact de l'adsorbant. La question importante concerne le sens qu'il faut donner à ces variations. Considérons à cet effet une solution de deux composants 1 et 2 contenant n_0 moles et mise au contact de m grammes d'adsorbant.

Soient :

n_1^s et n_2^s les nombres de moles adsorbées par unité de masse d'adsorbant.

n_1 et n_2 les nombres de moles en solution à l'équilibre.

x_1^0 et x_1 les fractions molaires en solution avant et après l'adsorption.

Par rapport au composant 1 par exemple, la variation de composition de la solution est donnée par :

$$\Delta x = x_1^0 - x_1 = \frac{n_2\, n_1^s\, m - n_1\, n_2^s\, m}{n_0(n_1 + n_2)} .$$

Le nombre de molécules adsorbées par unité de masse du solide est :

$$\frac{n_0\, \Delta x}{m} = n_1^s(1 - x_1) - n_2^s\, x_1 . \qquad (3)$$

Deux types d'isotherme peuvent alors être définis :

— l'isotherme composée : $\frac{n_0\, \Delta x}{m} = f(x_1)$;

— l'isotherme d'adsorption individuelle : $n_1^s = f(x_1)$.

La première isotherme donne une description complète de l'adsorption puisqu'elle tient compte des deux composants du mélange. Sa valeur est générale car elle n'implique aucune hypothèse quant aux interactions entre les molécules et l'adsorbant.

Pour un système quelconque, la mesure de la concentration du composant 1 n'est pas suffisante pour déterminer les quantités adsorbées. Si, par contre, la dilution de la solution est suffisante pour que la fraction molaire x_1 soit très petite, la relation (3) devient :

$$\frac{n_0 \Delta x}{m} \simeq n_1^s . \qquad (4)$$

Dans ces conditions les deux types d'isotherme sont confondus. Nous reviendrons sur ce point lors de l'étude de l'adsorption à partir d'un mélange de deux composants partiellement miscibles.

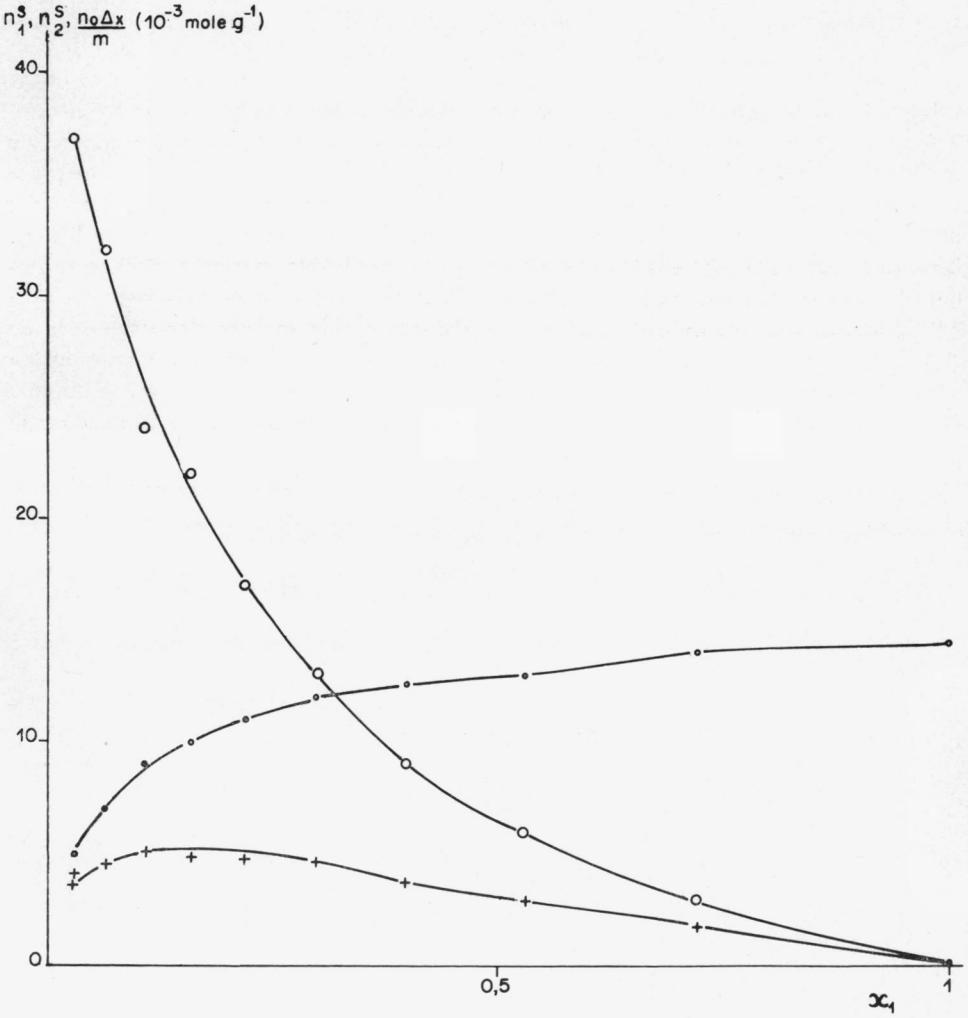


FIG. 2. — *Isothermes d'adsorption sur un charbon à partir d'un mélange eau-acide acétique.*
Isotherme d'adsorption individuelle (● : n_1^s ; ○ : n_2^s).
Isotherme composée (+ : $n_0 \Delta x/m$) (voir le texte).

Adsorption isotherms on a charcoal from a water-acetic acid mixture.
Individual adsorption isotherms (● : n_1^s ; ○ : n_2^s).
Composite adsorption isotherm (+ : $n_0 \Delta x/m$) (see the text) (in Kipling, 1965).

2. *Adsorption des molécules neutres.*

a) *Liquides miscibles.*

Différentes tentatives ont été effectuées pour utiliser les formalismes proposés pour décrire l'adsorption des gaz. Aucune ne s'est révélée totalement satisfaisante. Les études expérimentales sont d'ailleurs assez peu nombreuses. Citons par exemple l'adsorption d'eau et d'acide acétique par des charbons actifs (Kipling, 1965) et celle de l'eau et de différents alcools par des argiles (Chassin, 1977). Nous avons utilisé le premier exemple pour illustrer les notions d'isotherme d'adsorption composée et individuelle (fig. 2).

Le nombre de pesticides complètement miscibles à l'eau est réduit (ex. : alcool allylique) et nous n'avons pas trouvé de travaux concernant leur adsorption dans les sols.

b) *Composés partiellement miscibles.*

α) *Considérations générales.*

Il s'agit ici de composés pouvant se trouver sous la forme de gaz, de liquides ou de solides qui sont en général peu solubles dans l'eau. Cette situation correspond à la grande majorité des pesticides utilisés. Il en résulte que leur fraction molaire dans leur solution saturée dépasse rarement 10^{-4}. La figure 3 représente les mêmes données que la figure 2 avec cette fois une échelle logarithmique. Il apparaît ainsi que l'isotherme d'adsorption individuelle est suffisante pour décrire l'adsorption aux très faibles concentrations. Ceci a deux conséquences :

- pour déterminer les quantités adsorbées il suffit de mesurer la concentration des pesticides dans la solution en équilibre avec l'adsorbant ;
- l'adsorption de l'eau peut être négligée pour déterminer les quantités adsorbées. Cela ne veut pas dire cependant, qu'il ne faut pas tenir compte des molécules d'eau présentes sur la surface pour décrire les interactions soluté-adsorbant, ou les échanges soluté-solvant.

β) *Description des isothermes d'adsorption.*

β1) *Isotherme de Freundlich.*

Freundlich a étudié l'adsorption de nombreux solides à partir de leur solution mise en contact avec des adsorbants tels que des charbons actifs. Il a constaté comme pour les gaz que les résultats pouvaient s'exprimer à l'aide d'une relation du type :

$$Q = K_f \, Ce^{n_f} \tag{5}$$

avec $n_f < 1$ et où Ce est la concentration à l'équilibre.

Cette équation, très largement utilisée (des exemples sont donnés dans le chapitre III), ne repose sur aucune base théorique. L'expérience montre toutefois qu'elle décrit fort bien l'adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. Il faut cependant noter que les valeurs de n_f observées sont aussi bien supérieures qu'inférieures à 1.

β2) *Isothermes de la forme de l'isotherme de Langmuir.*

Une équation semblable à celle de Langmuir a été proposée pour décrire l'adsorption à partir de solutions :

$$Q = \frac{kK_L \, Ce}{1 + kCe}. \tag{6}$$

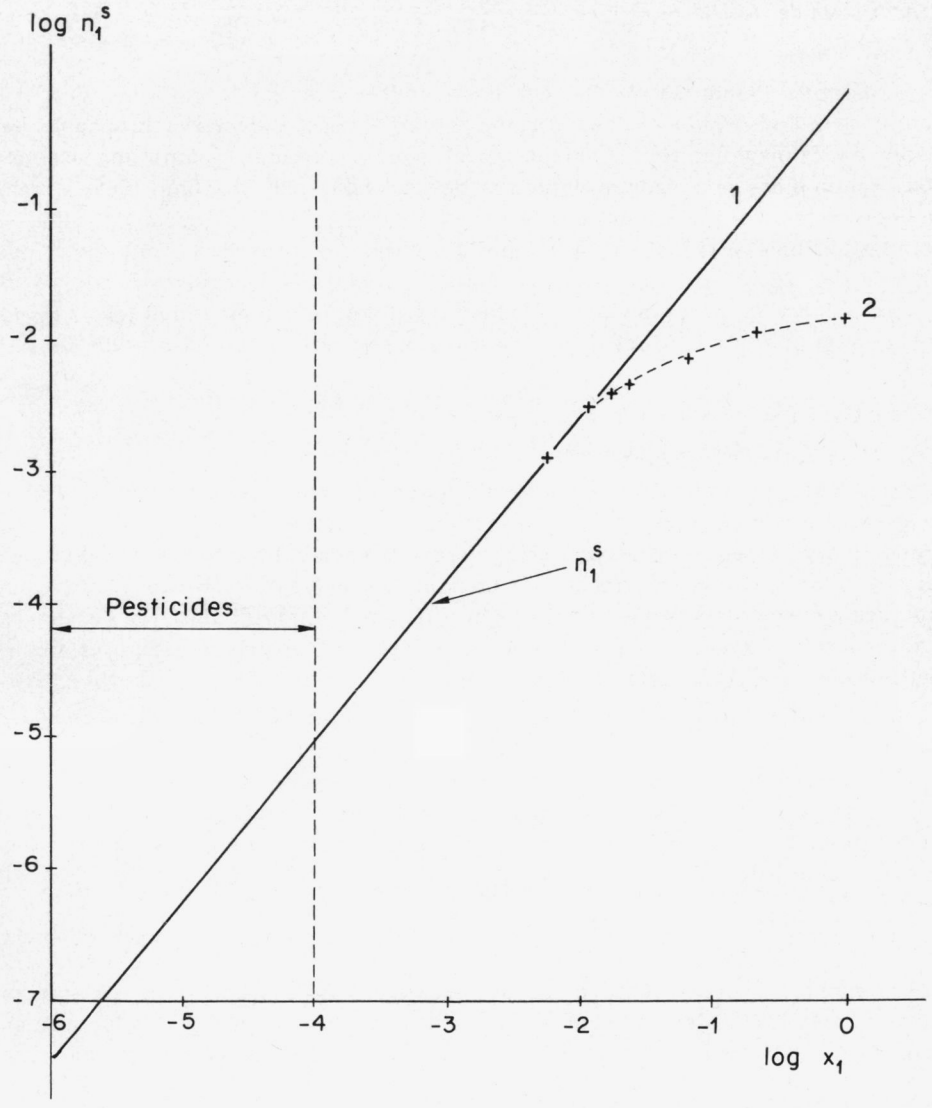


FIG. 3. — *Isothermes de la figure 2 représentés avec des coordonnées logarithmiques.*
Isothermes d'adsorption individuelle (1).
Isothermes composés (+ : $n_0 \Delta x/m$ (2)) (voir le texte).
Isotherm of figure 2 ploted with logarithmic coordinates.
Individual adsorption isotherms (1).
Composite adsorption isotherm (+ : $n_0 \Delta x/m$ (2)) (see the text).

Elle a été utilisée par Weber et Gould (1966) pour décrire l'adsorption de plusieurs pesticides sur un charbon actif et par Moreale et Van Bladel (1979) pour l'adsorption de l'aniline et de la parachloroaniline par des sols.

Dans la forme initiale proposée par Langmuir, k et K_L sont des constantes. Pour

donner une valeur plus générale à cette expression, Giles *et al.* (1960) ont supposé que la constante k pouvait être considérée comme une fonction de la concentration Ce. En posant :

$$k = \omega Ce^{\beta} \qquad (\omega \text{ et } \beta = \text{constantes})$$

il vient :

$$Q = \frac{K_L\, \omega Ce^{(\beta+1)}}{1 + \omega Ce^{(\beta+1)}} \tag{7}$$

ω et β sont des constantes dont nous examinerons la signification possible ultérieurement lors de l'étude de la thermodynamique et de la cinétique de l'adsorption. Cette dernière relation est très intéressante car elle permet de décrire les différents types d'isotherme comme le montrent les valeurs prises par Q et dQ/dCe selon que β est une constante positive, négative ou nulle (tabl. 2).

TABLEAU 2

Les principaux types d'isothermes d'adsorption
The main types of adsorption isotherms

β	Q		$\frac{dQ}{dCe}$		Forme de l'isotherme
	Ce = 0	Ce grande	Ce = 0	Ce grande	
>0	0	K_L	0	0	S
<0	0	K_L	∞	0	H
0	0	K_L	K_L	0	L

Pour les très faibles valeurs de Ce, l'expression (7) se simplifie et devient :

$$Q \simeq K_L\, \omega Ce^{(\beta+1)}\ .$$

Cette expression est semblable à l'isotherme de Freundlich donnée par (5) avec $K_f = K_L\, \omega$ et $n_f = \beta + 1$.

Il apparaît ainsi que les valeurs de n_f peuvent être quelconques.

Une isotherme de type Freundlich peut donc effectivement convenir dans toutes les situations possibles pour décrire l'adsorption des pesticides dans la mesure où les concentrations restent très faibles, ce qui est généralement le cas du fait de leur faible solubilité. Signalons qu'une expression polynomiale de Ce est parfois utilisée pour décrire les isothermes d'adsorption (Lambert, 1964 ; Savage, Wauchope, 1974 ; Savage, 1976).

3. *Adsorption des électrolytes.*

Certains pesticides peuvent s'adsorber par échange d'ions. Ce sont soit des composés existant sous forme d'ions organiques (diquat, paraquat), soit des composés susceptibles de s'ioniser par fixation ou libération d'un proton (ex. : atrazine, 2,4-D). Les théories de l'échange d'ions sont exposées dans différents ouvrages (ex. : Helferich, 1962 ; Fripiat *et al.*, 1971), et Babcok (1963) en présente une étude critique appliquée aux sols. Nous nous limiterons donc au rappel des principaux développements proposés.

a) *Théorie de la couche diffuse.*

Elle est basée sur l'utilisation de l'équation de Gouy et repose sur deux hypothèses : la charge électrique de la surface est continue et uniforme et les ions adsorbés ne sont pas localisés. Deux équations fondamentales sont appliquées :

- *L'équation de Boltzmann.*

Elle permet de calculer le nombre de particules chargées en un point du système en fonction du potentiel électrique en ce point.

- *L'équation de Poisson.*

Elle permet de relier le potentiel électrique en un point du système à la densité de charge électrique sur la surface de l'adsorbant.

Il est alors possible d'obtenir des relations donnant la distribution des ions entre l'adsorbant et les solutions.

b) *Théories basées sur la loi d'action de masse.*

Dans la théorie précédente, la distribution des ions exprimée en fonction de la distance à la surface ne présente pas de discontinuité. Ici, par contre, on admet que la suspension est composée de deux phases distinctes : la phase de surface et la phase liquide.

L'équilibre d'échange entre deux ions A et B s'écrit :

$$\upsilon_A\, A_s + \upsilon_B\, B \rightleftarrows \upsilon_A\, A + \upsilon_B\, B_s\,.$$

L'application de la loi d'action de masse donne :

$$\frac{(B_s)^{\upsilon_B}\,(A)^{\upsilon_A}}{(A_s)^{\upsilon_A}\,(B)^{\upsilon_B}} = K_e$$

où (A_s) et (B_s) sont les activités des ions adsorbés et (A) et (B) celles des ions en solution.

Si les activités A et B peuvent être connues, les activités A_s et B_s sont par contre difficiles à évaluer. Les développements proposés se différencient par les hypothèses faites pour effectuer cette évaluation :

— *Théorie de Gapon.*

Les activités des ions adsorbés sont remplacées par le nombre de moles sur la surface et les activités des ions en solution par leurs concentrations.

— *Théorie de Vanseslow.*

On admet que l'activité des ions adsorbés est égale à leur fraction molaire dans la phase adsorbée. Elle a été appliquée par Gilmour et Coleman (1972) à l'étude de l'adsorption de triazines sur des acides humiques en milieu acide.

— *Théorie de Gaines et Thomas.*

Elle repose sur l'hypothèse de l'égalité entre les activités des ions adsorbés sur des surfaces homoioniques.

c) *Théories basées sur la thermodynamique statistique.*

Elles reposent sur les hypothèses suivantes :

- les charges électriques de la surface sont localisées,
- les ions adsorbés sont localisés,
- l'énergie d'interaction entre un site et un ion ne dépend que de sa charge et est indépendante des ions voisins.

Pour un échange entre des ions de même valence, le calcul de la répartition des ions conduit à une expression semblable à celle proposée par Vanseslow :

$$\frac{(N_B^S)^{\upsilon_B}\,(A)^{\upsilon_A}}{(N_A^S)^{\upsilon_A}\,(B)^{\upsilon_B}} = K_e\ .$$

Dans les cas des ions de valence différente il donne :

$$\frac{(A)^{\upsilon_A}\,(n_B)^{\upsilon_B}}{(B)^{\upsilon_B}\,(n_A)^{\upsilon_A}\,[q_A\,n_A + q_B\,n_B]^{(\upsilon_B-\upsilon_A)}} = K_e$$

N_A^S et N_B^S sont les fractions molaires dans la phase adsorbée. n_A et n_B sont les nombres de molécules adsorbées. Par ailleurs :

$$q_i = z_i - \frac{2\,z_i}{y} + \frac{2}{y} \qquad (i = A, B)$$

où q_i dépend de la valence z_i et de la géométrie de la surface par y. Des valeurs de ce paramètre sont données pour différents types de répartition sur la surface.

D'après Babcok (1963), cette dernière théorie semble la mieux adaptée à l'étude des échanges cationiques dans les sols.

C. — *Conclusions*

L'adsorption à l'interface gaz-solide est décrite avec beaucoup plus de précision que l'adsorption à l'interface solide-liquide. Dans ce dernier cas, les expressions des isothermes d'adsorption des molécules non chargées ne reposent pas sur des bases physiques suffisamment générales pour conduire à des informations précises sur les mécanismes physico-chimiques mis en jeu. Il faut donc les considérer comme des descriptions numériques. A cet égard, la relation de Freundlich semble commode et d'un usage assez général. On peut être tenté d'interpréter les valeurs de l'exposant n_f en fonction des énergies d'adsorption. Nous verrons cependant que ce genre de démarche est d'un intérêt très limité. La description de l'adsorption des molécules chargées repose par contre sur un certain nombre de considérations physico-chimiques. Il n'est pourtant pas possible d'en apprécier la valeur en raison du faible nombre d'applications à l'adsorption des pesticides.

Il faut toutefois noter que la relation de Freundlich peut toujours être utilisée en raison des faibles concentrations rencontrées.

Toutes les descriptions précédentes concernent la variation de la quantité adsorbée accompagnant une augmentation de la concentration. La situation inverse, la désorption, n'a jamais été évoquée. Nous verrons cependant, qu'il s'agit là d'un phénomène important pour les pesticides comme l'examen d'un certain nombre d'exemples nous le montrera. Il nous paraît néanmoins utile de signaler deux points particulièrement intéressants :

- l'isotherme de désorption peut ne pas être confondue avec l'isotherme d'adsorption ;
- les isothermes de désorption des pesticides peuvent aussi être décrites par la relation de Freundlich (troisième partie).

III. — Thermodynamique de l'adsorption

L'objet de ce paragraphe est limité au rappel des relations thermodynamiques fondamentales et à l'analyse des grandeurs énergétiques qui peuvent en être déduites. Les développements détaillés correspondants sont donnés dans plusieurs ouvrages généraux tels que ceux de Kipling (1965) et Fripiat *et al.* (1971) par exemple.

D'une façon générale, la variation d'énergie libre accompagnant une transformation d'un système contenant i composants est donnée par la relation :

$$dG = V\,dP - S\,dT + \sum_i z_i F \Delta\Psi\, dn_i + \gamma\, dA + \sum_i \mu_i\, dn_i$$

où :

V = volume ; P = pression ; T = température ; A = surface ;
S = entropie ; γ = tension superficielle ; μ = potentiel chimique ;
z = valence ; F = faraday ; $\Delta\Psi$ = différence de potentiel électrique ;
n = nombre de molécules.

Etant donné que l'échange d'ions ne concerne qu'un faible nombre de molécules pesticides, nous ne traiterons pas la thermodynamique de ce phénomène qui est complètement développée par ailleurs (Helferich, 1962). En l'absence de travail électrique et à pression et température constantes nous avons :

$$(dG)_{T,P} = \gamma\, dA + \sum_i \mu_i\, dn_i\,. \qquad (8)$$

La condition d'équilibre s'écrit alors :

$$(dG)_{T,P} = 0\,.$$

A. — *Adsorption à l'interface gaz-solide*

Soit un corps adsorbant placé dans un mélange gazeux contenant i composants. En négligeant le travail des forces de tension superficielle, la répartition des composants entre la phase gazeuse et la surface de l'adsorbant est régie à l'équilibre par la relation :

$$\sum_i (\mu_i^s - \mu_i^g)\, dn_i = 0$$

où μ_i^s et μ_i^g sont les potentiels chimiques dans la phase adsorbée et dans la phase

gazeuse. La solution générale de cette équation est donnée par un système de i équations simultanées :

$$\mu_i^s = \mu_i^g .$$

Deux grandeurs énergétiques peuvent être calculées à partir de cette égalité

- à pression bidimensionnelle π constante :

$$\left(\frac{d\ Ln\ P}{dT}\right)_\pi = \frac{\Delta H_\pi}{RT^2}$$

où ΔH_π est la chaleur d'adsorption ;

- à taux de recouvrement constant de la surface

$$\left(\frac{d\ Ln\ P}{dT}\right)_{n_i^s} = \frac{\Delta H_{iso}}{RT^2}$$

où ΔH_{iso} est la chaleur isostérique d'adsorption.

B. — *Adsorption à l'interface liquide-solide*

1. *Généralités.*

Nous avons été conduits à développer plus complètement le cas de l'adsorption à l'interface liquide-solide en raison de son importance pour l'adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants.

Considérons une solution aqueuse d'un soluté au contact d'un adsorbant. La situation la plus générale correspond à un échange entre les molécules de soluté et les molécules de solvant. Soient alors dn_1, le nombre de molécules de soluté adsorbées et dn_2 le nombre de molécules de solvant désorbées. L'équilibre correspondant s'écrit :

$$dn_2\ M_2^s + dn_1\ M_1^l \rightleftarrows dn_2\ M_2^l + dn_1\ M_1^s \qquad (9)$$

avec une constante K_e égale à :

$$K_e = \left(\frac{a_1^s}{a_1^s}\right)^\alpha \frac{a_2^l}{a_2^s} \qquad (10)$$

avec

$$\alpha = \frac{dn_1}{dn_2}$$

où a_i^s et a_i^l sont les activités dans la phase adsorbée et dans la phase liquide. D'après (8), en posant $dA = A_1\ dn_1 - A_2\ dn_2$, la condition thermodynamique d'équilibre est :

$$(\mu_1^s - \mu_1^l)\ dn_1 - (\mu_2^s - \mu_2^l)\ dn_2 + \gamma(A_1\ dn_1 - A_2\ dn_2) = 0$$

A_1 et A_2 étant les surfaces moléculaires du soluté et du solvant.

Comme dans le cas précédent, nous supposerons que le travail des forces de tension superficielle est négligeable. Ceci est une approximation raisonnable dans le cas où les valeurs A_1 et A_2 sont voisines ou quand la concentration de surface du soluté est faible (ce qui correspond à une faible variation de la composition de l'interface au cours de l'adsorption). Nous avons alors :

$$\alpha(\mu_1^s - \mu_1^l) - (\mu_2^s - \mu_2^l) = 0 . \qquad (11)$$

Cette relation peut être utilisée, d'une part pour établir une expression de l'isotherme d'adsorption, d'autre part pour calculer les grandeurs énergétiques correspondantes.

2. *Isotherme d'adsorption.*

En remplaçant dans (11) les potentiels chimiques μ_i par leur expression en fonction des activités il vient :

$$\alpha\,\Delta\mu_1^0 - \Delta\mu_2^0 + RT\,\mathrm{Ln}\left[\left(\frac{a_1^s}{a_1^l}\right)^{\alpha}\frac{a_2^l}{a_2^s}\right] = 0$$

où $\Delta\mu_i^0 = (\mu_i^s)^0 - (\mu_i^l)^0$ est la différence entre les potentiels de l'état standard dans la phase adsorbée et dans la phase liquide (l'état standard dans les deux phases liquides et adsorbées étant le constituant pur pour le solvant et le constituant infiniment dilué pour le soluté). En explicitant les fractions molaires, nous avons

$$a_i^s = x_i^s f_i^s \qquad \text{et} \qquad a_i^l = x_i^l f_i^l$$

et

$$x_1^s = x_1^l \frac{f_1^l}{f_1^s}\left(\frac{x_2^s f_2^s}{x_2^l f_2^l}\right)^{1/\alpha} \exp\left[\frac{\Delta\mu_0^2 - \alpha\,\Delta\mu_1^0}{\alpha RT}\right] \tag{12}$$

où x_i^s, f_i^s et x_i^l, f_i^l sont les fractions molaires et les coefficients d'activité respectivement dans la phase adsorbée et dans la phase liquide.

La relation (12) est une expression générale de l'isotherme d'adsorption. Elle est d'une utilité pratique limitée en raison des difficultés rencontrées dans l'évaluation des coefficients d'activité et des variations de potentiel chimique. Un exemple d'utilisation en est donné par Fu *et al.* (1948) pour l'étude de l'adsorption de l'acide butyrique par des charbons actifs à partir de solutions aqueuses. Le cas où α est égal à l'unité est un cas particulier intéressant. Dans ces conditions, en effet, la relation (12) s'écrit

$$x_1^s = \frac{k x_1^l}{1 + x_1^l(k-1)}$$

avec

$$k = \frac{f_1^l f_2^s}{f_1^s f_2^l}\exp\left[\frac{\Delta\mu_2^0 - \Delta\mu_1^0}{RT}\right].$$

Il apparaît ainsi que l'isotherme $x_1^s = f(x_1^l)$ est de la forme générale donnée par (7) avec :

$$k = f(K_L\,\omega Ce^{\beta}) \qquad \text{et} \qquad k - 1 = f'(\omega Ce^{\beta}).$$

Nous avons ici un moyen de relier les caractéristiques des isothermes d'adsorption aux variations de potentiel chimique et à la nature des milieux étudiés par les coefficients d'activité.

3. *Enthalpies d'adsorption.*

Le sens de l'enthalpie ou de la chaleur d'adsorption déterminée dans certains travaux n'apparaît pas toujours très clairement du fait de l'existence de plusieurs définitions possibles. Il est donc particulièrement important de les donner et d'en préciser le sens exact.

a) *Adsorption avec échange entre le soluté et le solvant.*

En utilisant l'égalité :

$$\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\mu}{T}\right)_{P,N} = -\frac{\overline{H}}{T^2}$$

N signifiant que la dérivation est faite à composition constante, la relation (11) devient :

$$\frac{\partial}{\partial T} \text{Ln}\left[\left(\frac{a_1^s}{a_1^l}\right)^{\alpha} \frac{a_2^l}{a_2^s}\right] = \frac{\alpha \Delta H_1 - \Delta H_2}{RT^2} \qquad (13)$$

ou encore d'après (10) :

$$\frac{\partial}{\partial T} \text{Ln } K_e = \frac{\Delta H}{RT^2}$$

avec :

$$\Delta H = \alpha \Delta H_1 - \Delta H_2 \; ; \quad \Delta H_1 = (H_1^s)^0 - (H_1^l)^0 \quad \text{et} \quad \Delta H_2 = (H_2^s)^0 - (H_2^l)^0$$

$(H_i^s)^0$ et $(H_i^l)^0$ sont les enthalpies des composants 1 et 2 dans leur état standard dans la phase adsorbée et dans la phase liquide.

En solutions diluées, nous avons

$$x_2^l \simeq 1, \qquad x_2^s \simeq 1 \qquad \text{et} \qquad f_1^s \simeq f_1^l \simeq f_2^l \simeq f_2^s \simeq 1$$

d'où

$$\frac{\Delta H}{RT^2} = \frac{\partial}{\partial T} \text{Ln}\left[\left(\frac{x_1^s}{x_1^l}\right)^{\alpha}\right] = \frac{\partial}{\partial T} \text{Ln}\left[\left(\frac{C_1^s}{C_1^l}\right)^{\alpha}\right]$$

C_1^l et C_1^s étant les concentrations dans la phase adsorbée et dans la phase liquide.

En admettant que ΔH est indépendante de la température, l'intégration de la relation précédente peut se faire de deux façons :

— sans conditions particulières :

$$\Delta H_a = \frac{\alpha R\left[\text{Ln}\left(\frac{C_1^s}{C_1^l}\right)_{T_2} - \text{Ln}\left(\frac{C_1^s}{C_1^l}\right)_{T_1}\right]}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \qquad (14)$$

ΔH_a est la chaleur d'adsorption ;

— à taux de recouvrement constant

$$\Delta H_{iso} = \frac{\alpha R[\text{Ln}(C_1)_{T_1} - \text{Ln}(C_1)_{T_2}]}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \qquad (15)$$

ΔH_{iso} est la chaleur isostérique d'adsorption. Elle est en général différente de ΔH_a. Le calcul de cette dernière se heurte à une difficulté : l'évaluation de la concentration de surface C_1^s. Une méthode pour l'obtenir a été proposée par Fu *et al.* (1948) et a été utilisée dans des études de l'adsorption du piclorame par des sols (Biggar et Cheung, 1973) et de chloroanilines (Moreale et Van Bladel, 1979).

b) *Adsorption sans échange entre le soluté et le solvant.*

Dans ces conditions, la relation (13) s'écrit pour des solutions diluées :

$$\frac{\partial}{\partial T} \operatorname{Ln} \frac{C_1^s}{C_1^l} = \frac{(H_1^s)^0 - (H_1^l)^0}{RT^2} = \frac{\Delta H_1}{RT^2}. \tag{16}$$

La chaleur d'adsorption ΔH_a et la chaleur isostérique d'adsorption ΔH_{iso} se définissent comme précédemment. Elles s'expriment par les relations (14) et (15) au coefficient α près, mais leur sens est évidemment différent de celui des chaleurs précédemment définies.

Nous avons signalé que les isothermes d'adsorption des pesticides pouvaient être décrites par une relation du type

$$Q = K_f \, Ce^{n_f}$$

soit en changeant de notation :

$$C_1^s = K_s (C_1^l)^{n_f}. \tag{17}$$

Remarquons tout d'abord que le passage de la constante de Freundlich K_f à la constante K_s dépend de la définition de C_1^s. En reportant la valeur de C_1^s donnée par la relation (17) dans l'expression de ΔH_a, il vient :

$$\Delta H_a = \frac{\alpha R[\operatorname{Ln} K_{s2} (C_{1\,T_2}^l)^{(n_{f2}-1)} - \operatorname{Ln} K_{s1} (C_{1\,T_1}^l)^{(n_{f1}-1)}]}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

où K_{s1} et K_{s2} sont les valeurs de K_s aux températures T_1 et T_2 ;
n_{f1} et n_{f2} sont les valeurs de n_f aux températures T_1 et T_2 ;
$C_{1\,T_1}^l$ et $C_{1\,T_2}^l$ sont les valeurs de C_1^l aux températures T_1 et T_2.

En supposant que n_f ne dépend pas de la température on a :

$$\Delta H_a = \frac{R \operatorname{Ln} \left[\frac{K_{s2}}{K_{s1}} \left(\frac{C_{1\,T_2}^l}{C_{1\,T_1}^l} \right)^{(n_f - 1)} \right]}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}.$$

Dès lors :

- Si $n_f = 1$

$$\Delta H_a = \frac{R \operatorname{Ln} \frac{K_{s2}}{K_{s1}}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{R \operatorname{Ln} \frac{K_{f2}}{K_{f1}}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

et compte tenu de (16) : $\Delta H_a = \Delta H_{iso}$.

Cette expression est celle que l'on obtient en appliquant la loi de Van't Hoff à

la constante de Freundlich K_f. Elle a été utilisée par Leenher et Ahlrich (1971) et par Van Bladel et Moreale (1974). Il est important d'attirer l'attention sur le fait que cette formule s'applique seulement dans les conditions où l'adsorption

— est décrite par un isotherme linéaire,
— se fait sans échange avec les molécules de solvant.

- Si $n_f \neq 1$

$$\Delta H_a \neq \Delta H_{iso} .$$

c) *Remarques.*

Les descriptions qui viennent d'être exposées ne représentent pas la totalité des analyses théoriques appliquées à la description de l'adsorption à partir des solutions aqueuses. Il faut notamment attirer l'attention sur les points suivants :

Etant donné que la chaleur isostérique dépend du taux de recouvrement, certains auteurs ont été conduits à proposer d'autres grandeurs énergétiques définies pour des concentrations de surfaces nulles. Cette approche a été appliquée à l'étude de l'adsorption par différents adsorbants du 2,4-D (Haque et Sexton, 1968), d'uraciles (Haque et Coshow, 1971), de l'aniline et de la parachloraniline (Moreale et Van Bladel, 1979).

L'enthalpie d'adsorption est le plus souvent déterminée à taux de recouvrement constant. Un procédé plus rigoureux consiste à faire cette détermination à pression bidimensionnelle constante comme l'ont fait Mills et Biggar (1969).

Il faut enfin remarquer que dans tous les développements précédents, l'état standard du soluté dans la phase liquide correspond à une solution infiniment diluée. La solution saturée en soluté peut aussi être prise comme état standard. Dans ces conditions, les isothermes d'adsorption sont tracées avec les concentrations réduites C_1^l/S_1 où S_1 est la solubilité du produit étudié à la température des mesures. Il est ainsi possible d'éliminer les effets de la température sur les interactions soluté-solvant. La chaleur isostérique d'adsorption déterminée à partir de cette représentation n'a pas la même valeur que précédemment puisque l'état de référence est différent.

d) *Signification des chaleurs d'adsorption.*

A pression et volume constants, les variations d'enthalpie sont égales aux variations d'énergie du système. Celles-ci sont les suivantes pour le passage du soluté de la phase liquide dans la phase adsorbée : W_i^s, W_i^l, étant les énergies du constituant respectivement dans les états adsorbé et en solution, nous avons :

$$\begin{array}{ccccccc} & \text{Phase liquide} & & & & \text{Phase adsorbée} & \\ & \overset{W_1^l}{\leftrightarrow} & & & & \overset{W_1^s}{\leftrightarrow} & \\ \text{Solvant} & & \text{Soluté} & \Rightarrow & \text{Soluté} & & \text{Surface} \\ & \underset{W_2^l}{\leftrightarrow} & & & & \underset{W_2^s}{\leftrightarrow} & \\ \text{Solvant} & & \text{Soluté} & \Leftarrow & \text{Solvant} & & \text{Surface} \end{array}$$

Dans le cas où l'adsorbant se fait avec échange entre des molécules de soluté et des molécules de solvant, le bilan énergétique s'établit de la façon suivante :

$$\Delta W = (W_1^s \, dn_1 + W_2^l \, dn_2) - (W_1^l \, dn_1 + W_2^s \, dn_2)$$

et

$$\Delta W = W_1^s - W_1^l$$

dans le cas où il n'y a pas d'échange.

La situation est plus simple pour l'adsorption des gaz. Les interactions entre les molécules dans la phase gazeuse peuvent en général être négligées de telle sorte que les valeurs mesurées reflètent directement les valeurs de W_1^s. La distinction entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique peut alors se faire aisément. Ce n'est pas le cas pour l'adsorption à l'interface solide-liquide où l'expression de ΔW montre que W_1^s n'est pas directement accessible.

Dans le cas de l'adsorption à partir des solutions, les valeurs de l'enthalpie ne peuvent pas permettre de parler d'adsorption physique ou d'adsorption chimique. Elles sont le résultat d'un bilan et peuvent *a priori* être faibles ou élevées. De ce fait, elles ne sont pas suffisantes pour décrire les mécanismes de l'adsorption.

C. — *Conclusion*

La thermodynamique de l'adsorption à l'interface gaz-solide est relativement plus simple que pour l'adsorption à l'interface liquide-solide. Dans ce cas l'étude la plus générale consiste à examiner les variations en fonction de la température :

- de K_e pour la chaleur d'adsorption ;
- de C_1^l pour la chaleur isostérique d'adsorption.

Ces valeurs sont directement accessibles quand il n'y a pas d'échange. Dans le cas contraire, il faut connaître la stœchiométrie de l'échange. L'utilisation du coefficient de distribution K_a pour déterminer l'enthalpie d'adsorption n'est correcte que dans la situation très particulière où il n'y a pas d'échange et où l'isotherme d'adsorption est linéaire.

IV. — Cinétique des phénomènes d'adsorption

A. — *Généralités*

La plus grande partie des travaux publiés est consacrée à l'étude des systèmes en équilibre. Il existe donc relativement peu d'informations théoriques et expérimentales sur les cinétiques des phénomènes d'adsorption des pesticides.

D'une façon générale, la vitesse d'adsorption vraie n'est pas toujours mesurée directement. Les mesures portent en effet sur les variations de composition de la phase au contact de l'adsorbant, variations qui sont le résultat de plusieurs phénomènes :

- diffusion moléculaire dans la phase gazeuse ou liquide ;
- diffusion moléculaire dans l'adsorbant si celui-ci est poreux ;
- diffusion moléculaire sur la surface de l'adsorbant ;
- adsorption et désorption.

Les différents types de diffusion n'ont pas tous la même importance selon les pesticides et selon l'état d'hydratation du milieu. C'est ainsi notamment, que la diffusion moléculaire dans la phase gazeuse est rarement limitante. Quant à la diffusion dans les pores et sur la surface, elle dépend essentiellement de la structure de l'adsorbant. Par ailleurs, il semble que l'on puisse parler d'équilibre instantané quand l'adsorption n'est pas localisée et qu'elle met en jeu de faibles énergies. Dans ce cas, la diffusion

moléculaire est seule limitante. Quand l'adsorption est localisée ou concerne des énergies élevées ou est précédée d'une réaction de dissociation, la vitesse d'adsorption peut être faible et l'équilibre peut ne pas être atteint instantanément. Dans ces conditions, l'expression de la vitesse globale de variation de composition tient compte soit de la diffusion moléculaire (comme précédemment), soit de l'adsorption, soit des deux si ces phénomènes sont caractérisés par des constantes de temps du même ordre de grandeur. De telles situations ont été observées dans le cas de l'adsorption de certains pesticides (Lindstrom *et al.*, 1970 ; Khan, 1973*a*). Elles seront décrites ultérieurement.

B. — *Les lois de vitesse basée sur l'adsorption seule*

Elles sont rigoureusement exactes quand l'énergie d'adsorption est élevée. Dans ce cas en effet, la probabilité qu'une molécule adsorbée a de s'échapper de la surface est faible et la désorption peut être négligée. Dans les autres cas, il s'agit d'une approximation dont il est difficile d'évaluer l'importance.

1. *La loi d'Elovitch.*

La vitesse d'adsorption d'un composé gazeux en excès suit en général la loi d'Elovitch dans le cas où il s'agit d'une adsorption chimique (Fripiat *et al.*, 1971) :

$$\frac{dn^s}{dt} = a \exp(-\alpha n^s) \qquad n^s = \text{nombre de molécules adsorbées .}$$

Les constantes a et α n'ont pas de sens physique particulier car cette relation est empirique et n'a jamais reçu de justification théorique.

2. *La loi de proportionnalité.*

Un principe généralement accepté est celui de la proportionnalité entre la vitesse d'adsorption et le nombre de sites libres (n*) ou encore le taux de la surface non couverte (1 — θ) :

$$\frac{dn^s}{dt} = k_v\, n^* \qquad \text{ou} \qquad \frac{dn^s}{dt} = k'_v(1 - \theta) .$$

Plusieurs expressions particulières ont été proposées notamment par :

- Swearingen et Dickinson (in Kipling, 1965) :

$$\frac{d(Q_\infty - Q_t)}{dt} = k_{v1}(Q_\infty - Q_t) ;$$

- Lindstrom et Bœrsma (1970) qui explicitent la valeur de Q_t en utilisant l'isotherme de Freundlich :

$$\frac{dQ_t}{dt} = k_{v2}(K_f\, C_e(t)^{n_f} - Q_\infty) .$$

Dans ces expressions, les paramètres k_v sont des constantes de vitesses et Q_∞ représente la quantité maximum pouvant être adsorbée.

C. — *Les lois de vitesse basées sur l'adsorption et la désorption*

Un développement plus général consiste à tenir compte de l'adsorption et de la désorption. Dans ces conditions, le nombre net de molécules adsorbées par unité de temps est égal à :

$$dn = \underset{(dn^s)}{\text{nombre de molécules adsorbées}} - \underset{(dn^d)}{\text{nombre de molécules désorbées.}}$$

Les vitesses $\frac{dn^s}{dt}$ et $\frac{dn^d}{dt}$ peuvent s'exprimer de la façon suivante (Fripiat *et al.*, 1971) :

$$\frac{dn^s}{dt} = \begin{bmatrix}\text{Nombre de chocs entre}\\ \text{les molécules et la}\\ \text{surface}\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}\text{Coefficient}\\ \text{d'efficacité}\\ \text{des chocs}\\ (E)\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}\text{Probabilité de choc}\\ \text{entre les molécules de}\\ \text{soluté et la surface}\\ f(\theta)\end{bmatrix}$$

$$\times \text{ [Facteur de température]}$$

$$\frac{dn^d}{dt} = E' \times \begin{bmatrix}\text{Probabilité de}\\ \text{désorption}\\ g(\theta)\end{bmatrix} \times \text{[Facteur de température]}$$

$$E' = \text{Cte}\,.$$

La théorie cinétique des gaz permet de calculer le nombre de chocs Nc entre les molécules de gaz et la surface d'un adsorbant :

$$Nc = \frac{P}{\sqrt{2\,\pi m k_B\, T}}$$

où m est la masse moléculaire du gaz et k_B la constante de Boltzmann. Pour les solutions diluées, P est remplacée par la concentration du soluté (C).

Le coefficient d'efficacité E traduit le fait que tous les chocs ne sont pas favorables à l'adsorption.

Le facteur de température résulte de l'application de la théorie de Boltzmann et fait intervenir les énergies libres d'activation d'adsorption et de désorption, ΔGa^* et ΔGd^*. La vitesse dn/dt s'écrit alors :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn^s}{dt} - \frac{dn^d}{dt} = \frac{C.E}{\sqrt{2\,\pi m k_B\, T}}\,(f(\theta))\,\exp\left(-\frac{\Delta Ga^*}{RT}\right) - E'\,g(\theta)\,\exp\left(-\frac{\Delta Gd^*}{RT}\right). \qquad (18)$$

Lindstrom *et al.* (1970) ont utilisé une telle approche en proposant d'une part, des valeurs pour les fonctions $f(\theta)$ et $g(\theta)$, d'autre part des relations entre les énergies libres d'activation et le taux de surface couverte θ.

A l'équilibre, la vitesse est nulle et la relation (18) conduit à une expression de l'isotherme d'adsorption semblable à celle donnée par (7) avec :

$$\omega K_L\, Ce^{\beta} = \frac{E}{E'\,\sqrt{2\,\pi m k_B\, T}}\,\exp\left(\frac{\Delta Gd^*}{RT}\right)$$

et

$$\omega Ce^{\beta} = \frac{E}{E' \sqrt{2\,\pi m k_B T}} \exp\left(\frac{\Delta Gd^* - \Delta Ga^*}{RT}\right).$$

D. — *Remarque*

Les développements qui viennent d'être donnés concernent l'adsorption d'un seul composant et négligent donc les éventuelles compétitions entre les différents types de molécules présentes dans le système. Elles doivent cependant être prises en compte quand l'adsorption a lieu par échange entre des molécules de soluté et des molécules de solvant. La vitesse apparente d'adsorption peut alors être limitée, soit par la vitesse réelle d'adsorption du soluté, soit par la vitesse de désorption du solvant.

V. — Nature des liaisons pesticide-adsorbant

Plusieurs mises au point bibliographiques énumèrent et décrivent les différentes liaisons susceptibles d'exister entre des molécules organiques et des adsorbants minéraux ou organiques (Greenland, 1965*a* ; Mortland, 1970 ; Hayes, 1970 ; Cloos, 1972 ; de Borger, 1972 ; Khan, 1972 ; Calvet et Chassin, 1973 ; Theng, 1974 ; Green, 1974 ; Weed et Weber, 1974). Ces travaux ne concernant pas toujours les pesticides en particulier, il est utile de rassembler les informations relatives à ces composés. Il faut souligner que les descriptions qui suivent ne sont très souvent que des hypothèses car les méthodes classiques d'étude des liaisons ne peuvent pas toujours être appliquées en raison des faibles quantités de pesticides adsorbées.

Les différentes liaisons peuvent se classer en deux catégories suivant l'énergie mise en jeu :

- liaisons à énergie élevée ($>$ 20 kcal mole^{-1}) : liaisons ioniques et liaisons de coordination ;
- liaisons à faible énergie ($<$ 20 kcal mole^{-1}) : liaisons charge-dipole ($\simeq <$ 20 kcal mole^{-1}), liaisons hydrogène ($<$ 10 kcal mole^{-1}), liaisons de London Van Der Waals ($<$ 2 kcal mole^{-1}).

A. — *Liaisons à énergie élevée*

1. *Liaisons ioniques.*

Elles s'établissent entre des cations ou des anions organiques d'une part, et des charges négatives ou positives situées sur la surface de l'adsorbant d'autre part. Les molécules pesticides peuvent de ce point de vue se répartir en deux catégories : celles qui existent toujours sous forme d'ions et celles dont la forme ionique ou neutre dépend de l'acidité du milieu. Les premières sont essentiellement représentées par les sulfonates d'alcoyle et les ammoniums quaternaires (diquat, paraquat), les secondes sont des acides faibles (acides phénoxyacétiques) ou des bases faibles (triazines). Les propriétés d'ionisation de ces molécules sont donc très importantes et nous les examinerons dans le prochain chapitre.

Les liaisons ioniques sont faciles à mettre en évidence dans le cas des molécules

toujours ionisées car elles donnent lieu à un échange d'ions aisément observable (Weber *et al.*, 1965 ; Knight et Tomlinson, 1967 ; Knight et Denny, 1970 ; Khan, 1973*b* ; Arvieu, 1979). Pour les autres molécules, la situation est moins simple et ces liaisons prennent un caractère hypothétique certain.

2. *Liaisons de coordination.*

Elles s'établissent entre des atomes donneurs d'électrons comme N et O, et des métaux de transition, et elles ont été mises en évidence par les données de la spectrométrie d'absorption infrarouge. L'établissement de ces liaisons entraîne en effet des modifications des fréquences de vibration des groupes C — O et C — N. Ces observations ne sont pas toujours possibles, notamment dans les milieux très hydratés en raison de la compétition existant entre les molécules organiques et les molécules d'eau (Farmer, Alrich, 1969).

Des exemples sont donnés par l'adsorption de plusieurs pesticides sur des montmorillonites saturées par différents cations : aminotriazole (Russel *et al.*, 1968), E. P. T. C. (carbamate) (Mortland et Meggitt, 1966), linuron (Khan, 1974). Étudiant l'effet de différents cations, Hance (1971) est également conduit à admettre l'existence de liaisons de coordination pour le linuron adsorbé sur divers matériaux.

B. — *Liaisons à faible énergie*

1. *Liaisons charge-dipôle.*

Les charges électriques négatives ou positives d'un adsorbant et les ions compensateurs peuvent constituer des sites d'adsorption pour les molécules pesticides polaires. Comme précédemment, leur adsorption se trouve aussi en compétition avec celle des molécules d'eau.

Ce type de liaisons existe probablement avec tous les cations métalliques lorsqu'il n'y a pas de formation de complexes de coordination. C'est le cas par exemple du linuron adsorbé sur des acides humiques saturés par différents cations (Khan et Mazurkewich, 1974).

2. *Liaisons hydrogène.*

Les atomes d'azote et d'oxygène et les groupements $\rangle$N—H et O—H sont essentiellement responsables de la formation de ces liaisons. Il est donc possible de les rencontrer compte tenu de la structure chimique des molécules pesticides et des adsorbants. De plus, les molécules d'eau d'hydratation de ces derniers jouent probablement un rôle également important.

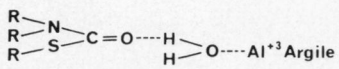
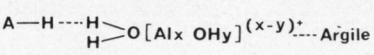
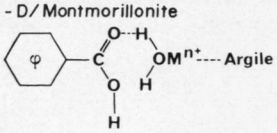
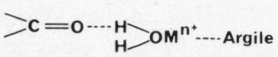
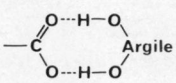
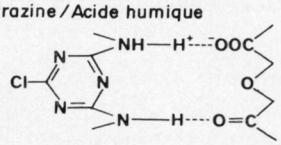
Il faut noter l'absence de preuves expérimentales directes de l'existence de ces liaisons dans le cas des pesticides adsorbés. Leur introduction repose parfois sur des informations expérimentales indirectes, le plus souvent sur de simples schémas hypothétiques. Malgré ces réserves, deux catégories de liaisons hydrogène peuvent être décrites :

- les liaisons avec les molécules d'eau,
- les liaisons avec des groupements de l'adsorbant.

Quelques exemples sont donnés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Exemples de liaisons hydrogène
Examples of hydrogen bonds

EXEMPLES	AUTEURS
Carbamates / Montmorillonite Al^{+3} 	MORTLAND, MEGGIT, 1966 BAILEY et al., 1968
Atrazine / Montmorillonite Al^{3+} chauffée à 300° C 	CALVET, TERCÉ, 1975
2,4 - D / Montmorillonite 	DIEGUEZ CARBONELL, RODRIGUEZ PASQUAL, 1975
Urées substituées / Montmorillonite 	Van BLADEL, MOREALE, 1974
Picloram / Kaolinite 	BIGGAR, CHEUNG, 1973
Atrazine / Acide humique 	LI, FELBECK, 1972 SULLIVAN, FELBECK, 1968

3. *Liaisons par transfert de charges.*

Elles ont été fréquemment citées dans le cas de l'adsorption des cations bipyridillium par des argiles (Haque *et al.*, 1970 ; Khan, 1973*b* et *c*). Elles sont dues au transfert d'électrons de la surface de l'adsorbant sur les noyaux aromatiques. Leur existence a été avancée à partir des propriétés spectroscopiques des molécules adsorbées. En effet, la longueur d'onde d'absorption UV augmente et la fréquence de vibration C—H hors du plan du cycle diminue à la suite de la formation de ces liaisons. Le tableau 4 en donne un exemple.

TABLEAU 4

Influence de l'adsorption sur les longueurs d'onde d'absorption dans l'UV et l'infrarouge pour le diquat et le paraquat (Haque *et al.*, 1970)

UV and IR absorptions variations induced by adsorption for diquat and paraquat molecules

	Diquat		Paraquat	
	en solution	adsorbé	en solution	adsorbé
UV	309	317	258	278
mμ	318	327		
C-H IR	793	782	854	834
cm^{-1}				

4. *Liaisons de London Van Der Waals.*

Elles sont dues aux forces de dispersion. Elles interviennent probablement dans toutes les situations mais n'ont pas fait l'objet de description particulière pour les pesticides adsorbés. Elles peuvent devenir importantes pour les composés de poids moléculaire élevé.

C. — *Conclusion*

Les molécules de pesticides peuvent être retenues sur la surface des matériaux adsorbants par différentes liaisons. Compte tenu de la nature des constituants du sol et des molécules organiques, plusieurs types de liaisons peuvent exister simultanément. L'étude des interactions entre les molécules adsorbées et les surfaces est alors très souvent difficile. L'identification des liaisons n'est possible assez facilement que dans les cas particuliers des matériaux adsorbants purs. Dans le cas des sols, les systèmes sont trop complexes pour pouvoir proposer des descriptions très détaillées.

Reçu pour publication en décembre 1979.

Remerciements

Nous remercions vivement MM. J. Fripiat (Centre de Recherches sur les Solides à organisation et cristallisation imparfaites-Orléans), R. Hance (Weed Research Organization, Oxford, England) et J. Lhoste (Roussel Uclaf, Paris) pour l'aide qu'ils nous ont apportée dans la rédaction de ce mémoire.

Summary

Adsorption of pesticides by the soils and their constituents
Bibliographical review

I. — *Description of the adsorption phenomenon*

Adsorption of pesticides by the soils and their constituents takes place at the solid-gaz and/or liquid-solid interface. Adsorption isotherms of gaseous products are established from physical theories

and are expressed in various ways (formulation of Langmuir, of Brunauer, Emmett and Teller, of Freundlich). Adsorption from soluttons was not so extensively studied. A general description of this must take into account the molecular exchanges between the solute and the solvent, but due to the low concentration of pesticides in solution, this exchange may be neglected for the description of isotherms. A Langmuir type formulation with concentration dependent coefficients permit the study of the possible situations. With dilute solutions, this formulation reduces to a Freundlich type relation. This was frequently used but attention must be drawn to the fact that this is only a numerical description. Ion exchange theories are relevant for ionized molecules but they have not been used very much.

Thermodynamic studies are simpler in the case of adsorption of gaseous products than in the case of adsorption from solutions where a rigorous description has to take into account a molecular exchange between the solute and the solvent. This may explain the difficulty encountered in the interpretation of experimental values of enthalpy of adsorption. Application of the Van T'Hoff law to the equilibrium constants is of general value. Its application to the distribution coefficients is only valid if no exchange takes place and if adsorption isotherms are linear.

There are few kinetic studies of the adsorption of pesticides. Two kinds of theories have been used : in the first ones a proportionnality between the rate of adsorption and the number of free sites is assumed ; in the second ones, the description is more complete and takes into account both the adsorption and the desorption.

Bonds between adsorbed molecules and the surface of adsorbents may be of different nature : ionic bonds, charge-dipole and dipole-dipole bonds, hydrogen bonds an London Van der Waals bonds. Some of them may be identified by infrared spectrocopy studies in the case of pur materials. However, solute-surface interactions are often difficult to describe because several bonds may act simultaneously.

Zusammenfassung

Pestizidenadsorption durch die Böden und deren Bestandteile Schriftumsstudie

I. — *Beschreibung des adsorptionsvorganges*

Die Pestizidenadsorption durch die Böden, und deren Bestandteile, betrifft die Grenzflächen Gas — Feststoff und Flüssigkeit — Feststoff. Die Adsorptionsisothermen der gasartigen Produkte beziehen sich auf Beschreibungen, die sich auf physikalische Theorien stützen. Formulierung von Langmuir, von Brunauer, Emmett und Teller und von Freundlich. Die von Lösungen ausgehende Adsorption wurde nicht so ausführlich ausgearbeitet und eine allgemeine Beschreibung dieses Zustandes hat die molekularen Austausche zu berücksichtigen. In Berücksichtigung der Tatsache geringer Konzentrationen der in Lösung befindlichen Pestizide, können diese Austausche jedoch bei der Beschreibung der Adsorptionsisothermen vernachlässigt werden. Eine Formulation der Art von Langmuir, mit Konstanten in Abhängigkeit von der Konzentration, erlaubt alle möglichen Fälle zu beschreiben. Mit verdünnten Lösungen reduziert sich diese Formulation auf einen der Relation von Freundlich ähnlichen Ausdruck. Diese wird häufig angewandt, es muss jedoch die Tatsache ins Licht gestellt werden, dass es sich nur um eine einfache numerische Beschreibung handelt. Die Ionenaustauschtheorien sind für ionisierte Pestizidmoleküle angebracht, deren Anwendung war jedoch sehr beschränkt. Die Thermodynamik der Gasadsorption ist einfacher als jene der Adsorption in Lösung befindlicher Produkte. Eine strenggenaue Beschreibung muss in diesem Falle die eventuelle Existenz eines Austausches zwischen den Molekülen der Auflösung und den Molekülen des Lösungsmittels berücksichtigen. Dies ist die Erklärung der schwierigen Auslegung der experimentalen Werte der Enthalpien. Die Anwendung des Van T'Hoff Gesetzes auf die Gleichgewichtskonstante hat allgemeinen Wert. Seine Anwendung auf einen Verteilungskoeffizienten ist gültig unter der Bedingung, dass kein Austausch stattfindet und dass die Adsorptionsisotherme linear sind.

Die Arbeiten, die sich mit der Kinetik der Pestizidadsorption befassen, sind nicht zahlreich. Zwei Formulationsarten werden meistens angewandt. Die erste drückt die Existenz einer Verhältnisgleichheit zwischen der Adsorptionsgeschwindigkeit und der Anzahl unbesetzter Stellen aus, die zweite, vollständigere, berücksichtigt die Desorption.

Die Bindungen zwischen den Pestizidmolekülen und den Adsorbensflächen können sehr verschieden sein : ionische Bindung, Last-Dipol, Dipol-Dipol, Wasserstoffbindung und van der Waalsbindung. Im Falle von reinen Adsorbensstoffen kann die infrarote Adsorptionsspektroskopie manchmal erlauben die Wechselwirkungen zu erkennen. Im allgemeinen ist deren Untersuchung erschwert durch die gleichzeitige Existenz mehrerer Bindungsarten.

РЕЭЮМЕ

Ъиблиографическое обозрение адсорбция пестицидов в почвах и их компонентах.

I. Описание явления адсорбции.

КАЛЬВЕ Р., ТЭРСЭ М., АРВЁ Ж. С.

Адсорбция иестицидов в почвах и их компонентах касается поверхностей раздела газовой-твёрдой и жидкой-твёрдой фаз. Изотермы адсорбции газовых продуктов были описаны на основе физических теорий : формулировки ЛАНГМУИРА, БРУНАУЭР ЭММЭТА и ТЕЛЛЕРА, ФРЕЙНДЛИХА. Адсорбция в растворах изучилась менее иодробно. Поэтому в её общем описании нужно учитывать молекулярные обмены между растворителем и растворённым веществом. Вследствии слабых концентраций растворённых пестицидов, можно упустить эти обмены в описании изотерм адсорбции. Формулировка типа ЛАНГМУИРА имеет иостоянные величины, зависящие от концентрации, и позволяет описать всевозможные случаи. Со слабыми растворами, формулировка сводится к выражению, подобному отношению ФРЕЙНДЛХА. Хотя она применяется очень часто, нужно подчеркнуть что она — простое численное описание. Теории ионных обменов подходят ионизированным молекулам пестицидов, но они употребляютоя очень редко.

Термодинамика адсорбции газов — более простая чем термодинамика растворённых продуктов. В этом случае, строгое описание должно учитывать случайное существование обмена между молекулами растворённого вещества и молекулами растворителя. Так объясняются трудности в объяснении опытных величин энтальпий. Применение закона ВАН Т'ОФФА к константе равновесия имеет всеобщее значение. Его применение подходит коэффициенту распределения с условием, чтобы обмена не было и чтобы изотерма адсорбции была линейная.

Труды в области кинетики адсорбции пестицидов — малочисленны. Два типа формулировки применяются чаще всех. Первый тип выражает существование зависимости скорости адсорбции от числа не занятых мест, второй тип, более полный, учитывает десорбцию.

Связи молекул пестицидов с поверхностью адсорбентов очень различаются : ионные связи, заряд-диполь, диполь-диполь, водородная связь, связь ВАН ДЕР ВААЛЬСА. В случае чистых адсорбентов, инфракрасная спектроскопия абсорбции позволяет иногда узнать взаимодействия. Вообще, одновременное существование разных типов связей затрудняет эти исследования.

Références bibliographiques

ARVIEU J. C., 1980. Recherches sur le comportement du bromure de méthyle dans les sols : étude de sa dissolution aqueuse. *Ann. agron.* (à paraître).

BABCOCK K. L., 1963. Theory of chemical properties of soil colloïdal systems at equilibrium. *Hilgardia*, **34,** 417-542.

BAILEY G. W., WHITE J. L., ROTHBERG T., 1968. Adsorption of organic herbicides by montmorillonite role of pH and chemical character of adsorbate. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **32,** 222-234.

BIGGAR J. W., CHEUNG M. W., 1973. Adsorption of Picloram 4 Amino 3.5.6 trichloropicolinic acid on panoche, Ephrata and palouse soils. A thermodynamic approach to the adsorption mechanism. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **37,** 863-868.

BOWMAN B. T., ADAMS R. J., FENTON S. W., 1970. Effet of water upon malathion adsorption onto five montmorillonite systems. *J. Agric. Food Chem.* **18,** 723-727.

CALVET R., CHASSIN P., 1973. Complexes organiques des argiles : Mécanismes de formation. Méthodes d'études et applications. *Bull. Groupe Franç. Argiles*, T. XXI, 87-113.

CALVET R., TERCÉ Martine, 1975. Adsorption de l'atrazine par des montmorillonite-Al. *Ann. agron.*, **26,** 693-707,

CHASSIN P., 1975. *Etude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols*. Thèse de doctorat ès sciences physiques, Paris VI.

CLOOS P., 1972. Interactions entre les pesticides et la fraction minérale du sol. *Pédologie*, XXII, 148-173.

DE BOER J. H., 1953. *The chemical character of adsorption*. Oxford at the Clarendon Press, 239 p.

DE BORGER R., 1972. L'adsorption de molécules non ionisées d'herbicides par la matière organique du sol. *Rev. Agric. Belge*, 201-208.

DIEGUEL-CARBONELL D., RODRIGUEZ PASCUAL C., 1975. Adsorption of the herbicide 2.4-D by montmorillonite. *Env. Qual. Saf. Suppl.* 3, *Pesticides*, 237-242.

FARMER W. J., AHLRICHS J. L., 1969. I.R. studies of the mechanism of adsorption of urea d_4, methylurea d_3 and I-I dimethylurea d_2 by montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33,** 254-259.

FRIPIAT J., CHAUSSIDON J., JELLI A., 1971. *Chimie-physique des phénomènes de surface. Applications aux oxydes et aux silicates*. Masson et Cie Editeurs, 387 p.

FU Y., HAMSEN R. S., BARTELL F. E., 1948. Thermodynamics of adsorption from solutions. I. Mobility and activity coefficients of adsorbed layers. *J. Phys. Chem.*, **52,** 374-386.

GILES H., MAC EVAN T. H., NAKHWA S. N., SMITH D., 1960. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. *J. Chem. Soc.*, III, 3973-3993.

GILMOUR J. T., COLEMAN N. T., 1972. s. triazine adsorption studies : Ca-H-humic acid. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **35,** 256-259.

GLASSTONE S., LAIDLER K. J., EYRING H., 1941. *The theory of rate process*. Mac Graw-Hill Book Company, Inc., New York and London, 611 p.

GORING C. A. I., HAMAKER J. W., 1972. *Organic chemicals in the soil environment*, Vol. I. Edited by : Marcel Dekker, Inc., New York, 440 p.

GREEN R. E., 1974. In Guenzi W. D., *Pesticides in soil and water*. 3-37, Soil Sci. Soc. Am., Inc., Publisher, Madison, Wisconti, USA.

GREENLAND D. J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. I. Mechanisms of interaction between clays and defined organic compounds. *Soils Fertilizers*, **28,** 521-532.

GUENZI W. D., 1974. *Pesticides in soil and water*. Soil Sc. Soc. Am., Inc., Publisher, Madison, Wisconti, USA, 562 p.

HANCE R. J., 1971. Complex formation as an adsorption mechanism for linuron and atrazine. *Weed Res.*, **11,** 106-110.

HAQUE R., COSHOW W. R., 1971. Adsorption of Isocil, Bromacil from aqueous solutions on some mineral surfaces. *Environ. Sci. Techn.*, **5.** 139-141.

HAQUE R., LILLEY S., COSHOW W. R., 1970. Mechanism of adsorption of diquat and paraquat on montmorillonite surface. *J. Colloid interface Sci.*, **30,** 185-188.

HAQUE R., SEXTON R., 1968. Kinetic and equilibrium study of the adsorption of 2.4-Dichlorophenoxy acetic on some surfaces. *J. Colloid Interface Sci.*, **27,** 818-827.

HAYES M. H. B., 1970. In Gunther F. A. and Gunther J. D., *Residue reviews*, **32,** 131-174. Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.

HELFFERICH F., 1962. *Ion exchange*. New York, San Francisco, Toronto, London. Mc Graw-Hill Book Company, Inc., 624 p.

JURINAK J. J., VOLMAN D. D., 1957. Application of the BET equation to ethylene dibromide adsorption by soils. *Soil Sci.*, **83,** 487-496.

KEARNEY P. C., KAUFMAN D. D., 1975. *Chemistry degradation and mode of action*. Edited by Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 500 p.

KHAN S. U., 1972. Adsorption of pesticides by humic substances ; a review. *Environmental letters*, **3,** 1-12.

KHAN S. U., 1973*a*. Equilibrium and kinetic studies of the adsorption of 2,4-D and picloram in humic acid. *Canad. J. Soil Sci.*, **53,** 429-434.

KHAN S. U., 1973*b*. Adsorption of bipyridylium herbicides by humic acid. *J. envir. Quality*, **3,** 202-206.

KHAN S. U., 1973*c*. Interaction of humic substances with bipyridylium herbicides. *Canad. J. Soil Sci.*, **53,** 199-204.

KHAN S. U., 1974. Adsorption of linuron by montmorillonite. *Canad. J. Soil Sci.*, **54,** 235-237.

KHAN S. U., MAZURKEWICH R., 1974. Adsorption of linuron on humic acid. *Soil Sci.*, **118,** 339-343.

KIPLING J. J., 1965. *Adsorption from solutions of non electrolytes*. Academic Press, London, New York, 328 p.

KNIGHT B. A. G., DENNY P. J., 1970. The interaction of paraquat with soil adsorption by an expanding lattice clay mineral. *Weed Res.*, **10,** 40-48.

KNIGHT B. A. G., TOMLINSON T. E., 1967. The interaction of paraquat (1.1-dimethyl 4.4 dipyridylium dichloride) with mineral soils. *J. Soil Sci.*, **18,** 233-243.

LAMBERT S. M., 1967. Functional relationships between sorption in soil and chemical structures. *J. Agr. Food Chem.*, **15,** 572-576.

LEENHEER J. A., AHLRICHS J. L., 1971. A kinetic and equilibrium study of the adsorption of carbaryl and parathion upon soil organic matter surfaces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35,** 700-704.

LI G. C., FELBECK G. T., 1972. A study of the mechanism of atrazine adsorption by humic acid from much soils. *Soil Sci.*, **113,** 140-148.

LINDSTROM F. T., BOERSMA L., 1970. Theory of chemical transport with simultaneous sorption in a water saturated porous medium. *Soil Sci.*, **110,** 1-9.

LINDSTROM F. T., HAQUE R., COSHOW W. R., 1970. Adsorption from solution. III. A new mode for the kinetic of adsorption desorption processes. *J. Phys. Chem.*, **74,** 495-502.

MILLS A. C., BIGGAR J. W., 1969. Adsorption of 1.2.3.4.5.6-Hexachlorocyclohexane from solutions : the differential heat of adsorption applied to adsorption from dilute solutions on organic and inorganic surfaces. *J. Colloid Interface Sci.*, **29,** 720-731.

MOREALE A., VAN BLADEL R., 1979. Soil interactions of herbicides derived aniline residues. A thermodynamic approach. *Soil Sci.*, **127,** 1-9.

MORTLAND M. M., 1970. Clay organic complexes and interactions. *Adv. Agron.*, **22,** 75-114.
MORTLAND M. M., MEGGIT W. F., 1966. Interaction of ethyl N.N-di-n-propylthiolcarbamate (EPTC) with montmorillonite. *J. Agr. Food Chem.*, **14,** 126-129.
RUSSEL J. D., CRUZ M. I., WHITE J. L., 1968*a*. The adsorption of 3 aminotriazole by montmorillonite. *J. Agr. Food Chem.*, **16,** 21-24.
SAVAGE K. E., 1976. Adsorption and mobility of metribuzin in soil. *Weed Sci.*, **24,** 525-528.
SAVAGE K. E., WAUCHOPE R. D., 1974. Fluometuron adsorption-desorption equilibria in soil. *Weed Sci.*, **22,** 106-110.
SULLIVAN J. D., FELBECK G. T., 1968. A study of the interaction of s. triazine herbicides with humic acids from three different soils. *Soil Sci.*, **106,** 42-52.
SWEARINGEN L. E., DICKINSON B. N., 1965. Cited in Kipling, p. 230, *J. Phys. Chem.*, 1936, **36,** 534.
THENG B. K. G., 1974. *The chemistry of clay organic reactions.* Adam Hilger, London, 343 p.
VAN BLADEL R., MOREALE A., 1974. Adsorption of fenuron and monuron (substituted ureas) by two montmorillonite clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **38,** 244-249.
WEBER W. J., GOULD J. P., 1966. Sorption of organic pesticides from aqueous solution. *Ad. Chem. Series*, **60,** 270-304.
WEBER J. B., PERRY P. W., UPCHURCH R. P., 1965. The influence of temperature and time on the adsorption of paraquat, diquat, 2.4-D and prometone by clays, charcoal and an anion exchange resin. *Soil Sci. Soc. Proc.*, **29,** 678-688.
WEED J. B., WEBER J. B., 1974. In Guenzi W. D., *Pesticides in soil and water*, 39-66. Soil Sci. Soc. Am., Inc., Publisher, Madison, Wisconti, USA.

Ann. agron., 1980, **31** (1), 63-84.

Etude bibliographique

Incidence de la température des racines sur la croissance et le développement des plantes

P. CORNILLON

Laboratoire d'Agronomie
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

La température des racines est susceptible d'être modifiée par diverses techniques culturales dont le modelé du sol, le paillage plastique, le chauffage du sol et la culture hors sol.

Aussi la connaissance du mode d'action de ce facteur édaphique présente un grand intérêt pour les agronomes et les praticiens qui se préoccupent d'un élargissement du calendrier de production de nombreuses espèces végétales.

Parmi les hypothèses émises, de nombreux auteurs font jouer un grand rôle à la température dans son action sur les phénomènes de transition de phase qui se déroulent dans les membranes cytoplasmiques. Les modifications de la composition lipidique permettent au végétal de garder le maximum de fluidité à ses membranes.

1. — Introduction

La température des racines constitue un facteur essentiel pour la croissance et le développement de la plante. Elle influe, en effet, sur les différentes fonctions du système racinaire et elle affecte les relations entre le système racinaire et la partie aérienne du végétal. Parmi ces fonctions (absorption, transfert, respiration et transformation des éléments minéraux), la plus importante est constituée par l'absorption de l'eau et des éléments minéraux nécessaires pour la croissance et le développement de la plante.

D'autre part, les possibilités de croissance de certaines espèces à contre saison sont liées à l'absorption des éléments minéraux (Mayberry et Rausch Kolb, 1975) et l'aire d'extension des plantes cultivées tient aux températures relevées dans le sol au moment de la mise en place des plantes (Ballif et Dutil, 1974). De même, la répartition géographique de nombreuses espèces naturelles comme les plantes des régions alpines et subalpines dépend du niveau respiratoire atteint dans les racines (Higgins et Spomer, 1976).

La température au niveau des racines dépend essentiellement des conditions thermiques du milieu ambiant, mais elle peut varier avec les techniques culturales et notamment le modelé, le chauffage ou la couverture du sol (Cooper, 1973). Ces pratiques culturales se sont énormément développées ces dernières années, ce qui a

entraîné la multiplication des études et l'apparition d'une mise au point bibliographique par Cooper (1973) qui fait suite à celle de Richards *et al.* (1952).

Mais une étude bibliographique complémentaire nous est apparue nécessaire pour tenir compte des nouveaux travaux concernant l'étude de la température des racines en milieu contrôlé et du développement accéléré des techniques culturales modifiant la température des racines.

Au cours de ce mémoire, après avoir étudié l'influence de la température des racines sur l'activité physiologique du végétal et sur la croissance et le développement de la plante, nous aborderons le problème des températures de racines en conditions naturelles et les modifications entraînées par les techniques culturales.

2. — Température des racines et activité physiologique

2.1. — *Absorption de l'eau*

Depuis les premières observations effectuées par Hales (cf. Crafts *et al.*, 1949) au début du XVIIIe siècle, de nombreux auteurs ont étudié les effets de la température du substrat sur l'absorption de l'eau par la plante. Ces travaux ont montré que les prélèvements d'eau augmentent avec la température mais que la réaction varie fortement selon les espèces végétales (Cannel *et al.*, 1963 ; Cox et Boersma, 1967 ; Singh *et al.*, 1971). En général, les espèces originaires des régions chaudes et les plantes qui poussent l'été sont plus affectées par le refroidissement du sol que celles qui proviennent de régions froides (Kramer, 1956).

Relation température du substrat-prélèvement en eau.

Les effets de la température du substrat sur les prélèvements en eau ont été étudiés pour de nombreuses espèces et pour divers substrats : sol, tourbe et solution nutritive (Kuiper, 1963). Ces études ont permis de caractériser la relation existant entre la température et les prélèvements en eau : courbe et point singulier correspondant à un seuil variant avec le temps d'étude du phénomène. Mais généralement, les relations qui peuvent exister entre la température du substrat et celle de l'atmosphère ambiante ne sont pas prises en compte.

Quand nous analysons la relation existant entre la température du substrat et les prélèvements en eau, nous notons divers types de courbes (Kuiper, 1964*a*). D'une part, les courbes pour lesquelles la dépendance vis-à-vis de la température donne une valeur linéaire au phénomène avec deux segments de droite de pente différente. D'autre part, une relation non linéaire de type courbe logistique qui traduit une croissance sigmoïdale bornée aussi bien au début qu'à la fin du phénomène. Même après correction de l'effet dû à la viscosité de l'eau, nous conservons ces deux types de relation qui proviennent des effets de la température sur la perméabilité de la membrane cytoplasmique et sur l'état du cytoplasme.

La vitesse de refroidissement et la longueur du temps d'exposition aux faibles températures semblent avoir quelque influence sur la réduction des prélèvements en eau. Ainsi des espèces réagissent différemment quand elles sont rapidement ou lentement refroidies. Bohning et Lusanandana (1952) trouvent que les plantes de Tomate

et de Tournesol, dont la température des racines est lentement refroidie, ne flétrissent pas. Par contre, si la température passe brusquement de 25 °C à 5 °C, ces espèces flétrissent fortement. Ce même traitement provoque l'apparition de nécroses permanentes sur Haricot. La vitesse d'absorption d'eau des plantes maintenues à basse température avec une alimentation hydrique proche de l'optimum tend à revenir à son niveau initial. Ces deux réactions de la plante suggèrent qu'il se produit des changements compensatoires dans la structure du protoplasme de certaines espèces. Ces changements peuvent être similaires à ceux qui se produisent pendant l'endurcissement au froid.

Seuil de température racinaire.

Différents auteurs notent la présence d'un seuil au-dessous duquel la nutrition hydrique est fortement réduite et dont la valeur est variable selon l'espèce. Ainsi, un abaissement de température provoque une réaction très marquée de la plante à partir de 5 °C pour le Tournesol (Bohning et Lusanandana, 1952), le Chou (Kramer, 1942) et la Luzerne (Ehrler, 1963). Elle se situe entre 12 °C et 15 °C pour le Haricot (Kuiper, 1964*b* ; Unger et Danielson, 1967 et Bohning et Lusanandana, 1952) et la Tomate (Brouwer et Van Vliet, 1960 ; Cornillon, 1974*a*), à environ 20 °C pour la Pastèque et le Cotonnier (Kramer, 1942) et entre 18 °C et 20 °C pour le Melon (Risser *et al.*, 1978).

Mais d'autres auteurs ne trouvent pas de seuil remarquable pour diverses espèces. Les études sur Tomate (Abd El Rahman *et al.*, 1959 ; Abd El Hafeez *et al.*, 1971) sont effectuées dans une plage de température supérieure au seuil observé avec un substrat qui tamponne les effets directs de la température. De même, Rajan (1964) conduit ses expérimentations entre 15 °C et 35 °C avec du Tournesol dont les exigences sont peu importantes pour le niveau de température du sol. Par contre, Raleigh (1941) n'observe pas de seuil pour les prélèvements en eau du Melon malgré une très large plage de température étudiée.

La différence entre espèces de région froide (Chou, Luzerne et Tournesol) et espèces de région chaude (Coton et Pastèque) est vraiment frappante (tabl. 1, Kramer, 1942). On doit noter pour ces dernières plantes que les changements s'effectuent à une

TABLEAU 1

Effet de la température du sol sur la transpiration
(d'après Kramer, 1942)

Influence of soil temperature on water absorption by plants of various species
(from Kramer, 1942)

Espèces	Température du sol	Transpiration des plantes en p. 100 du témoin à 25 °C
Chou	12 °C	63,0
Coton	12 °C	7,4
Pastèque	6,5 °C	9,0
Pin loblolly	0,5 °C	13,7
Pin blanc.....	0,5 °C	25
Troëne	2,5 °C	47
Orme	0,5 °C	25
Tournesol	1,0 °C	27

température comprise entre 15 °C et 20 °C. De même, Kozlowski (1964) trouve que l'absorption de l'eau par les plantules de *Pinus taeda*, espèce originaire du Sud, est fortement réduite entre 10 °C et 15 °C tandis que le *Pinus strobus*, espèce nordique, absorbe beaucoup plus d'eau à ces températures.

Ce seuil de température racinaire pourrait être lié pour certaines espèces à une modification de la viscosité du cytoplasme. En effet, Bohning et Lusanandana (1952) ont noté le parallélisme étroit qui existe entre la modification de viscosité du cytoplasme chez *Amoeba* et les variations d'absorption d'eau chez le Haricot sous l'effet d'une variation de température.

Les modifications de nutrition hydrique sont très rapides (Barlow *et al.*, 1977). En effet, ces auteurs ont noté que l'abaissement de température réduit d'abord le grandissement cellulaire par une diminution de l'absorption de l'eau et ensuite la transpiration et la photosynthèse.

2.2. — *Nutrition minérale*

Les effets de la température sur l'alimentation minérale de la plante ont surtout été étudiés dans le cas d'expériences conduites sur sol. Aussi convient-il de ne pas oublier que les conséquences observées proviennent non seulement d'un effet direct sur la plante mais aussi de l'action indirecte sur la disponibilité des éléments minéraux dans le sol. Les résultats sont extrêmement variables selon l'élément, la plante et même l'organe considérés.

En ce qui concerne l'azote, dans la plupart des cas, la concentration dans les feuilles est une fonction croissante de la température pour diverses espèces végétales : Tomate (Canham, 1958 ; Cannel *et al.*, 1963 ; Martin et Wilcox, 1963), Dactyle (Finn et Mack, 1964), Chou (Delvalle et Harmon, 1967), Maïs (Walker, 1969 ; Moraghams et Porter, 1975), Jujubier (Reyes *et al.*, 1977) et Melon (Risser *et al.*, 1978). Mais Nielsen *et al.* (1961) ont observé une diminution du taux d'azote des feuilles de Maïs et de Brome quand la température augmente, en présence ou en l'absence de fumure azotée. Par contre, pour les racines de Tomate, nous avons noté une élévation du taux d'azote organique à faible température (Cornillon, 1974*a*). Aussi, apparaît-il nécessaire pour cet élément de faire une distinction entre l'absorption par les racines et la migration vers la partie aérienne de la plante. Mais l'absorption de l'azote nitrique et celle de l'azote ammoniacal sont réduites à faible température et cette action est surtout marquée pour l'azote nitrique (Frota et Tucker, 1972 ; Cornillon, 1977).

La teneur en phosphore des feuilles augmente avec la température racinaire dans de très nombreuses expériences avec les végétaux les plus variés : Pomme de terre, Tomate, Dactyle, Maïs... Seuls, Nielsen *et al.* (1961), dans l'expérience citée précédemment, notent une diminution du pourcentage de phosphore dans les feuilles de Brome en présence ou en l'absence de fumure phosphatée. Les autres organes de la plante (racine, tige et pétiole) ont une teneur en phosphore qui augmente avec la température entre 12 °C et 30 °C pour la Tomate et entre 12 °C et 21 °C pour le Melon.

Pour le potassium, le calcium et le magnésium, les résultats apparaissent extrêmement divergents. Ainsi pour la Tomate et le Maïs, selon les auteurs, la teneur des feuilles en ces éléments semble une fonction croissante ou décroissante de la température et parfois même aucune variation n'est mise en évidence (Canham, 1958 ; Nielsen *et al.*, 1960 ; Cannel *et al.*, 1963 ; Martin et Wilcox, 1963).

En utilisant une solution nutritive, nous avons noté (Cornillon, 1974*a*) une augmentation de la teneur en cations dans les organes de la partie aérienne de la Tomate au début de la période végétative. Ensuite, l'influence de la température s'estompe avec cependant la présence d'un palier au-dessous duquel la richesse en cations reste nettement plus réduite. Dans les racines, le taux de potassium augmente avec la température jusqu'à un maximum atteint à une température variable selon l'espèce (Cooper, 1973).

La plupart des espèces réagissent à une élévation de la température par une élévation parallèle de la teneur en élément minéraux jusqu'à un maximum atteint à une température variable selon l'espèce et l'élément considérés. Au-delà de cette température, il apparaît une chute brutale du pourcentage de l'élément analysé. Dans certains cas particuliers, la teneur en éléments minéraux est une fonction inverse de la température. Il existe aussi des observations montrant une relation plus complexe entre la température des racines et la teneur en éléments minéraux (Cooper, 1973). Naturellement, le comportement d'une espèce n'est pas homogène pour tous les éléments minéraux et à tous les stades physiologiques.

2.3. — *Respiration*

La température du substrat influence fortement l'activité respiratoire du système racinaire. Ainsi Jensen (1960) a observé une forte augmentation du niveau respiratoire des systèmes racinaires intacts de Tomate et de Maïs en utilisant le principe du tonomètre quand la température s'élève. La valeur de l'intensité respiratoire dépend du passé immédiat de la plante. En effet, quand on travaille avec des séquences de température croissante ou décroissante, les valeurs mesurées diffèrent. Parallèlement, la valeur du Q_{10} diminue quand la température augmente comme celui des prélèvements en eau de la plante. Ces observations rejoignent celles de Guinn et Hunter (1968) qui ont mis en évidence à faible température une accumulation de sucres et d'amidon dans les racines. Ils attribuent cette accumulation des produits de la photosynthèse à une diminution de l'intensité respiratoire.

Travaillant sur des poils absorbants, Cailloux (1971) a montré que l'absorption de l'eau s'effectue essentiellement au niveau de la masse cytoplasmique principale, alors que le phénomène est presque inexistant au niveau de la vacuole. En outre, quand l'intensité du métabolisme est réduite, il se produit une excrétion à partir du poil absorbant. De même, il est apparu que les inhibiteurs des réactions métaboliques (cyanure, azide, ...) réduisent la perméabilité des racines à l'eau et l'allure du phénomène paraît voisine de celle obtenue par une variation de température (Mees et Weatherley, 1957 ; Ahmad et Cailloux, 1971 ; Slatyer, 1967). En effet, entre 2.10^{-6} et 2.10^{-5} M, Ahmad et Cailloux (1971) ont montré que le cyanure, l'azide de sodium et le fluorure de sodium stimulent l'activité respiratoire et la pénétration de l'eau dans les poils absorbants. A 2.10^{-4} M, l'absorption d'eau décline et à 2.10^{-3} M, le poil n'absorbe plus que 55 p. 100 de l'eau par rapport au témoin. A ces concentrations, il se produit aussi une inhibition de la respiration.

Les effets observés avec l'abaissement de la température des racines ou avec les inhibiteurs des réactions métaboliques permettent de penser qu'il apparaît dans les deux cas une altération des fonctions de la membrane cellulaire.

2.4. — *Structure de la membrane*

La plupart des membranes sont constituées d'environ 40 p. 100 de lipides et 60 p. 100 de protéines (Lehninger, 1970). La fraction lipidique de la membrane est surtout constituée de lipides polaires de différents types : phospholipides et glycolipides essentiellement. Le rapport des divers types de lipides polaires de la membrane est caractéristique du type de membrane, du type de cellule et de l'espèce. Par contre, les acides gras composant les lipides peuvent subir des variations sous l'effet des facteurs du milieu.

L'utilisation de certains composés chimiquement actifs sur les membranes, comme l'acide alkényl succinique, a permis d'observer des modifications de perméabilité cellulaire et de la résistance au gel de certains organes (Kuiper, 1964*b* et 1969). La modification de perméabilité serait obtenue par incorporation de cette molécule à longue chaîne carbonée insaturée dans les lipides de la membrane cytoplasmique. D'autre part, Kuiper (1963) modifie la perméabilité d'une couche monomoléculaire d'acide stéarique par incorporation d'un certain pourcentage d'acide oléique. Quand le pourcentage d'acide oléique augmente dans l'acide stéarique, la membrane ainsi formée reste plus perméable à l'eau aux faibles températures que la membrane contenant uniquement l'acide stéarique.

L'influence du froid sur la synthèse des acides gras des membranes a été étudiée par différents auteurs (Lyons *et al.*, 1964 ; Gerloff *et al.*, 1966 ; Harris et James, 1969 ; Grenier *et al.*, 1973). Lyons *et al.* (1964) ont montré que la membrane des mitochondries d'espèces résistant au gel contient un pourcentage beaucoup plus élevé d'acides gras insaturés que les variétés sensibles. De même, Gerloff *et al.*, (1966) travaillant sur des racines de Luzerne, ont mis en évidence une augmentation de la teneur en acide gras sous l'effet du froid et plus spécialement des acides linoléique et linolénique. Récemment, Grenier *et al.* (1973) ont montré sur racines de Luzerne que l'incorporation d'acétate ^{14}C dans l'acide linoléique est très faible à 22 °C et devient importante à 1 °C (tabl. 2).

TABLEAU 2

Biosynthèse des acides gras dans les racines de deux variétés de luzerne
(d'après Grenier *et al.*, 1973)

Main fatty acids of alfalfa roots during hardening
(from Grenier *et al.*, 1973)

Acides gras	Variétés			
	Rambler (sensible au froid)		Caliverde (résistante au froid)	
	1 °C	22 °C	1 °C	22 °C
Acide palmitique.....	13	23	15	25
Acide palmitoléique....	8	27	12	24
Acide stéarique.....	1	5	5	5
Acide oléique.....	33	40	40	36
Acide linoléique.....	45	5	28	10

Les phénomènes de résistance au froid et de perméabilité de membranes apparaissent liés et le métabolisme des acides gras peut intervenir dans les modifications de perméabilité observées sous l'influence des basses températures. Des transitions de phase apparaissent dans les membranes cytoplasmiques avec le passage d'un système de cristal liquide à un gel solide qui perturbe le métabolisme du végétal. Selon les espèces, cette transformation se produit à une température plus ou moins basse ce qui permet une croissance et un développement normal dans des conditions plus ou moins favorables.

3. — Influence de la température sur la croissance et le développement de la plante

La température optimum de croissance pour les racines apparaît en général inférieure à celle de la partie aérienne (Nielsen et Humphries, 1966). Cet optimum peut varier selon la phase végétative ou la période de développement considérée et selon l'espèce végétale étudiée.

3.1. — *Matière sèche*

En général, il apparaît une augmentation du poids de la matière sèche avec l'accroissement de température jusqu'à un optimum au-delà duquel le poids de la matière sèche décline. La température affecte non seulement l'importance du poids obtenu en fin de culture, mais également le taux de croissance, c'est-à-dire l'accroissement par unité de temps et parfois l'accélération de croissance.

Ainsi Cannell *et al.* (1963) ont observé une augmentation très importante de la production de matière sèche pour une culture de Tomate quand la température passe de 12,2 °C à 20 °C. Au-delà de 20 °C, la croissance de la Tomate est moindre. D'autre part, le taux moyen de croissance journalier varie fortement en fonction du traitement et de l'époque où est effectuée la mesure. De même, Boxall (1962) obtient des résultats très voisins avec une autre variété de Tomate. Dans nos essais (Cornillon, 1974*a*), il apparaît un seuil de température situé entre 12 °C et 15 °C pour lequel la production de matière sèche est multipliée par un facteur 2, et au-delà, jusqu'à 30 °C, la production de matière sèche n'est pas modifiée.

Proebsting (1957), sur deux variétés de Fraisiers, observe pour une culture de 3 mois, une température optimum proche de 25 °C, et la dépendance des plantes est surtout marquée pour les températures supérieures à l'optimum. Yamaguchi *et al.* (1975) ont montré que la production de l'Oignon (*Allium cepa* L.) est la meilleure à 18 °C ou 24 °C et la précocité plus grande à 29 °C (tabl. 3). Par contre, la croissance de la partie aérienne est très réduite à 13 °C.

Barr et Pellett (1972) ont étudié l'effet de la température des racines sur certaines espèces ligneuses : *Ligustrum vulgare*, *Cornus stolinifera*, *Physocarpus opulifolius*, *Ribes alpinum*, *Lonicera* et *Weigela*. La température la plus favorable pour la production de matière sèche est variable selon l'espèce étudiée entre 20 °C pour *Lonicera* et 26 °C pour *Cornus stolonifera*. Les autres espèces montrent un comportement intermédiaire.

La réponse aux différentes températures des racines dépend non seulement de l'espèce mais aussi des variétés. Ainsi Risser *et al.* (1978) ont montré que les variétés de

TABLEAU 3

Effet de la température des racines sur la croissance de l'oignon
(d'après Yamaguchi *et al.*, 1975)

Influence of root temperature on onion growth
(from Yamaguchi *et al.*, 1975)

	13 °C	18 °C	24 °C	29 °C
Nombre de feuilles	18,4	19,4	19,4	18,6
Nombre de fleurs	0,98	0,64	0,0	0,0
Poids du bulbe (g)	98	113	128	110
Longueur du bulbe (mm)	58	61	69	72
Diamètre du bulbe	54	58	56	51
Matière sèche (p. 100)	18,1	16,2	17,9	18,1

Melon réagissent différemment à la température des racines. L'optimum de température est égal à 18 °C pour la variété Jacumba et dépasse 21 °C pour les autres cultivars : Doublon, Persian Small Type et Vedrantais.

D'après Cooper (1973), la courbe traduisant la réponse aux diverses valeurs de la température des racines s'apparente à une courbe normale caractérisée par une dissymétrie et un aplatissement très marqué.

Ces observations apparaissent valables pour la partie aérienne et pour les racines de nombreuses espèces végétales aussi bien les plantes annuelles que les plantes pérennes (Cooper, 1973).

3.2. — *Rapport de la masse racines-partie aérienne*

L'étude du rapport entre la masse des racines et celle de la partie aérienne permet d'obtenir des informations sur les liaisons existant entre la partie aérienne et le système racinaire de la plante. Mais il ne fournit pas de données quantitatives sur les échanges entre organes. En effet, l'importance de la partie aérienne n'est pas une fonction directe de la croissance racinaire. Au cours de nos expériences (Cornillon, 1974*a*), nous avons noté que la masse de racines passe par un minimum à 15 °C, alors que la production totale de matière sèche est très comparable à 15 °C, 18 °C et 30 °C.

Le rapport de la masse racine-partie aérienne chez le Maïs augmente quand la température des racines diminue aussi bien en milieu nitrique qu'en milieu ammoniacal (Moraghan et Porter, 1975).

Barr et Pellett (1972) observent des évolutions diverses selon l'espèce ligneuse considérée. Pour *Cornus stolonifera* Michx, la valeur du rapport diminue quand la température augmente entre 12 °C et 35 °C. Par contre, cette valeur passe par un maximum à une température intermédiaire entre 12 °C et 29 °C selon l'espèce considérée : chez *Weigela* 12 °C, *Physocarpus opulifolius* 17 °C, *Ribes alpinum* 19 °C, *Ligustrum vulgare* 27 °C et *Lonicera* 29 °C.

D'après Cooper (1973), les variations du rapport racines-partie aérienne dépendent de l'espèce, avec deux grands types de réponse : le rapport passe par un maxi-

mum à une température intermédiaire, ce qui note une accumulation plus importante de matière sèche dans les racines. Ce premier comportement correspond à celui du Maïs. La réponse opposée est caractéristique de la Tomate et du Fraisier qui possèdent une partie aérienne plus développée aux températures intermédiaires. Un troisième comportement peut être déduit des résultats obtenus avec *Cornus stolonifera*. La valeur du rapport diminue quand la température devient plus forte.

3.3. — *Allongement de la tige*

La hauteur de la tige augmente exponentiellement au cours du temps comme l'ont noté de nombreux auteurs (Abd El Rahman *et al.*, 1959 ; Cornillon, 1974*a* ; Grobbelaar, 1963). La hauteur, comme les autres caractéristiques morphologiques de la plante, est fortement influencée par la température des racines. La longueur maximum de la tige est obtenue à une température qui dépend de l'espèce. Pour le Maïs, l'allongement maximum est obtenu à 30 °C (Grobbelaar, 1963) ; pour la Tomate, cette caractéristique atteint son maximum à 25 °C environ et, pour la Pomme de terre, à 20 °C.

Chez la Pomme de terre, Madec et Perennec (1955) ont mis en évidence l'influence de la température de conservation sur la durée du cycle d'incubation. La période d'incubation correspond au temps qui s'écoule entre le départ de la germination et la formation des ébauches de tubercules par le germe. Les températures les plus favorables pour l'incubation se situent entre 15 °C et 25 °C. Ces auteurs ont montré qu'une conservation à température relativement élevée donne des germes ayant atteint ou presque atteint le stade d'incubation. Ces germes donnent naissance à des plantes dont la levée est moins régulière, le développement foliaire (hauteur et nombre de tiges) plus faible, la tubérisation beaucoup plus précoce, mais dont le rendement final en poids et en nombre de tubercules est nettement plus faible.

Madec (1956) a montré l'influence de la température du sol après la maturité du tubercule sur le boulage de la Pomme de terre. Les lots germés au moment de la récolte produisent significativement plus de boulage l'année suivante.

Mais les conditions d'expérimentation peuvent avoir une influence très nette sur l'élongation de la tige. Ainsi la longueur maximum de la tige de Tomate est obtenue entre 15 °C et 32 °C selon les auteurs. Ces variations doivent être liées aux valeurs des autres caractéristiques du milieu : type de substrat utilisé, rayonnement global, longueur de la photopériode, rapport entre la température de l'atmosphère ambiante et celle des racines...

Mais en général les courbes de réponse à la température des racines possèdent les caractéristiques de la courbe normale avec une déformation de ses caractéristiques. Certaines espèces (Rose, Pomme de terre, Blé de printemps) réagissent différemment avec une hauteur maximum à une température relativement faible (Cooper, 1973).

3.4. — *Floraison et fructification*

La température du système racinaire peut affecter la floraison. Ainsi Proebsting (1957), sur plants de Fraisiers, a montré que les fleurs apparaissent uniquement sur les

plantes dont la température des racines est inférieure à 18 °C, mais les stolons possèdent le plus grand développement à 24 °C. Liebig et Chapman (1963) notent sur Oranger une floraison très abondante à 14 °C, plus faible à 22 °C et nulle à 30 °C. Les températures relativement basses des racines peuvent jouer un rôle dans l'induction florale.

Stephens et Widmer (1976) ont montré que le Cyclamen (*Cyclamen persicum* Mill) réagit favorablement à un abaissement de la température du sol entre 29 °C et 13 °C. Chaque diminution d'environ 5 °C de la température au niveau des racines provoque une précocité accrue de la floraison et une augmentation moyenne du nombre de boutons par plante. L'action de ce facteur dépend aussi du stade végétatif auquel on applique le traitement.

La faible température des racines affecte la floraison des Tomates en agissant sur le nombre de fleurs par bouquet et en retardant l'épanouissement des premières fleurs (Cornillon, 1974*a*). Boxall (1962) effectue des notations voisines sur une autre variété de Tomate. Cooper (1973) rapporte que la floraison du Blé d'hiver et celle du Riz sont affectées par la température. Ce facteur agit sur le nombre de panicules et leur morphologie. La température des racines agit non seulement sur la floraison mais aussi sur la nouaison et la croissance du fruit.

L'influence de la température du substrat sur la production de fruits est démontrée dans le cas de la Tomate par les travaux de Boxall (1962). Cet auteur montre que la production est maximum entre 30 °C et 35 °C. Il a observé que l'élévation de la température des racines de Tomate de 16 °C à 25 °C, au cours du mois précédant la mise en place dans la serre, n'entraîne qu'une influence négligeable sur la production.

Par contre, dans nos essais (Cornillon, 1974*a*), la température modifie le nombre de fruits et leur poids moyen ; ainsi la meilleure production est obtenue à 18 °C par rapport à 12 °C, 15 °C et 30 °C. Cette différence d'optimum de température peut s'expliquer par les substrats utilisés : Boxall travaille avec la tourbe, nous travaillons en culture hydroponique.

Les différences entre espèces sont apparentes : l'Avoine possède un maximum de production à une température relativement faible tandis que le Maïs donne la meilleure production à température élevée et l'Orge montre un comportement intermédiaire (Cooper, 1973). Mais ces différences de comportement peuvent être accentuées ou atténuées en liaison avec les variations des autres facteurs de l'environnement et de leurs interactions avec la température des racines.

4. — Température des racines en conditions naturelles.

Au champ, les racines sont soumises à des températures différentes qui subissent des variations dans l'espace et dans le temps. A un instant donné, le système racinaire d'une plante est placé à différentes températures qui varient positivement ou négativement selon l'horizon.

Aussi, est-il nécessaire de procéder à une étude des quantités de chaleur reçue par le sol et des propriétés thermiques des matériaux qui déterminent les profils de température relevés au cours de la journée et pendant les saisons.

4.1. — *Source et quantité de chaleur*

La température du sol dépend essentiellement de la quantité d'énergie reçue du soleil. La quantité de chaleur qui atteint la surface du sol à partir du centre de la terre et celle qui résulte des réactions chimiques et biologiques sont négligeables.

Geiger (cf. Baver *et al.*, 1972) a estimé que seulement 45 p. 100 de la radiation totale atteint le sol un jour d'été sous nos latitudes. La distribution de cette radiation dépend de facteurs physiques dont la latitude, la pente du terrain et le couvert végétal sont très importants.

Latitude et pente du terrain.

La radiation reçue par unité de surface dépend de l'angle sous lequel le rayonnement atteint la surface du sol. Au-dessus du 30e degré de latitude, la radiation globale décroît rapidement pour se stabiliser ensuite au-delà du 60e degré.

L'exposition est un facteur très important en région tempérée surtout pour la croissance et le développement des cultures maraîchères. La mise en place des cultures s'effectue plus tôt au printemps sur les sols exposés au sud, ce qui permet ensuite une récolte plus précoce. Au sud, la température du sol est toujours supérieure de plusieurs degrés à celle observée sur les sols exposés au nord. Certains auteurs ont estimé que 1° de pente au nord est équivalent à 1° de latitude plus au nord et inversement pour l'exposition sud (Baver *et al.*, 1972).

Couvert végétal.

L'effet majeur du couvert végétal correspond à une isolation de la surface du sol. Aussi, un sol protégé est moins chaud en été et moins froid en hiver que le sol nu correspondant. En fait, la température de surface du sol sous un couvert végétal dépend de nombreux paramètres dont la structure du couvert végétal, la ventilation et le déficit hydrique (Perrier, 1975). D'après cet auteur, le couvert végétal peut provoquer des différences de température supérieures à 3 ^{o}C selon sa structure et la gamme de température étudiée. Les températures les plus élevées sont obtenues avec un couvert végétal dont la densité foliaire est maximum près du sol. Par contre, quand la densité foliaire est maximum à une hauteur égale ou supérieure à 1 m, l'isolation du sol est meilleure et la valeur du rayonnement est très faible au voisinage du sol. Ce type de couvert végétal correspond à une culture de Maïs au moment de la floraison de l'épi.

4.2. — *Flux de chaleur*

Pendant le jour, la surface du sol absorbe les radiations solaires et la chaleur gagne les horizons profonds du sol, tandis que la nuit, la surface du sol perd par radiation de la chaleur qui provient de la profondeur.

Le flux de chaleur dépend essentiellement de la composition, de la porosité et de l'humidité du sol. Le tableau 4 donne les caractéristiques thermiques du sol d'après Van Wijk (cf. De Villèle, 1975).

La conductivité thermique des différents constituants du sol décroît dans l'ordre suivant : sable > limon > argile > tourbe, avec de très faibles variations d'un type de

TABLEAU 4

Caractéristiques thermiques des constituants du sol
(d'après Van Wijk cf. De Villèle, 1975)
Thermal properties of various soil constituents
(from Van Wijk cf. de Villèle, 1975)

Nature des constituants	Conductivité thermique 10^{-3} cal.cm^{-1}.sec^{-1}.°C^{-1}	Chaleur spécifique volumique cal.cm^{-3}.°C^{-1}	Diffusivité thermique 10^{-3} cm^2.sec^{-1}
Constituants minéraux...	7	0,46	15
Constituants organiques..	0,6	0,60	1
Eau.....	1,42	1,00	1,4
Air	0,062	0,000 3	210

sol à un autre à l'exception de la tourbe. Nous voyons que la conductivité thermique est une fonction croissante de la taille des particules, ce qui s'explique par la surface de contact entre particules. Quand la taille des particules augmente, la surface de contact devient plus grande, ce qui améliore la conductivité thermique, l'air étant un isolant.

L'accroissement de densité occasionne un meilleur contact entre les particules ce qui provoque un accroissement de la conductivité thermique.

Mais c'est surtout l'eau qui améliore la conductivité thermique en assurant un meilleur contact entre les particules et surtout en remplaçant l'air présent dans les pores, ce qui multiplie ainsi la conductivité thermique (Baver *et al.*, 1972).

4.3. — *Variations de la température du sol*

La surface du sol peut atteindre des températures particulièrement élevées en fonction de la couleur et de la texture. Des sols noirs de l'Inde atteignent 75 °C en surface et des sols sableux du New Hampshire 67 °C (Cooper, 1973). Naturellement, en région tempérée, les températures à la surface du sol n'atteignent pas ces valeurs extrêmes. Ainsi, Ballif et Dutil (1975) ont observé des températures de 38,5 °C à 1 cm de profondeur dans la région champenoise.

Profil de température journalier.

Pendant le jour, la température du sol diminue quand la profondeur augmente et le phénomène s'inverse pendant la nuit. La figure 1 illustre ce phénomène (Ballif et Dutil, 1975).

Nous notons, pour un sol nu, que les températures maximums apparaissent respectivement à 13 h, 16 h, 19 h et 22 h à 1 cm, 10 cm, 20 cm et 30 cm de profondeur. De même, les minimums sont observés à 6 h, 7 h, 8 h et 11 h aux profondeurs correspondantes. L'onde thermique journalière s'amortit avec la profondeur parce que le sol possède une capacité thermique variable selon ses constituants (tabl. 1). En fonction du niveau de densité racinaire maximum et de la température dans cet horizon, il peut apparaître des problèmes de nutrition hydrique pour le végétal.

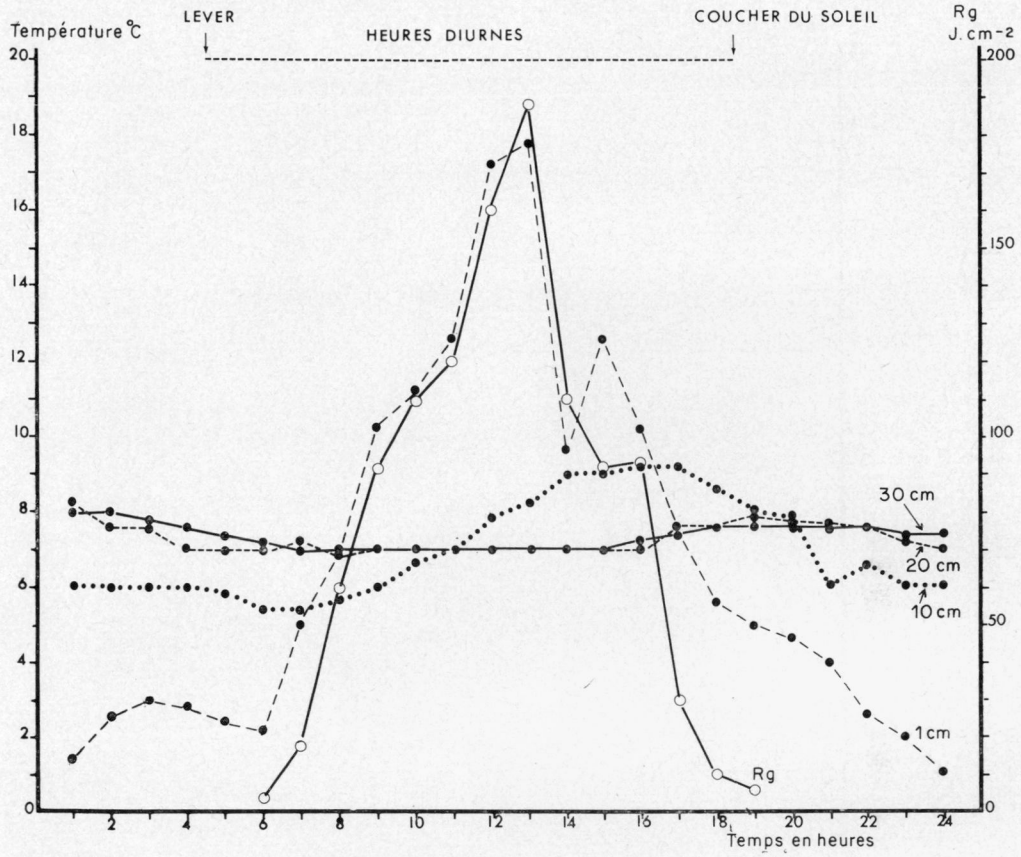


FIG. 1. — *Evolution thermique du sol nu au cours du 22 avril 1973 (Jour froid)* (d'après Ballif et Dutil, 1975).

Diurnal variation in temperature during the 22 April 1973 (cold day) (from Ballif and Dutil, 1975).

Mais cela signifie aussi qu'à un moment donné, un système racinaire est exposé à toute une série de températures qui fluctuent à chaque instant. Ces variations continuelles de température avec l'espace et avec le temps posent un obstacle très important quand on essaie de relier la croissance et la température du sol.

Profil thermique saisonnier.

Les variations saisonnières de la température du sol avec la profondeur sont semblables aux changements diurnes. Les mois d'été (juillet, août dans l'hémisphère nord), comme la mi-journée, correspondent au pic de la radiation globale et au maximum de température. Les mois d'hiver ont un effet similaire à celui des températures nocturnes journalières. Les données de De Villèle (1975) rapportées dans la figure 2 sont typiques des variations observées. Le réchauffement du sol se fait sur une période de 7 mois tandis que le refroidissement s'étale sur 5 mois environ. Il apparaît un déphasage dans la propagation de l'onde thermique annuelle puisque la température maximum est atteinte en juillet à 10 cm de profondeur et seulement au mois d'août pour les profondeurs supérieures.

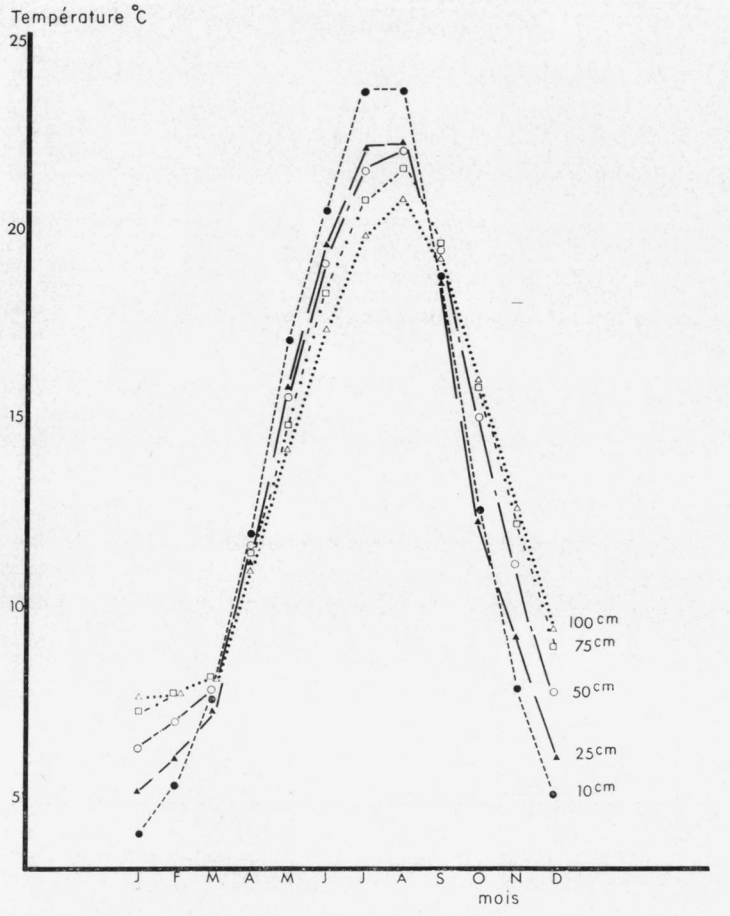


FIG. 2. — *Variations mensuelles de la température du sol en relation avec la profondeur* (d'après De Villèle, 1975).

Monthly variation of soil temperature in relation to depth (from de Villèle, 1975).

La valeur moyenne autour de laquelle varie la température du sol, à l'échelle annuelle, augmente légèrement avec la profondeur. Ces valeurs moyennes sont atteintes respectivement dans le courant du mois de mai et celui du mois d'octobre en région méditerranéenne.

La connaissance de la température du sol aux différentes périodes de l'année permet de déterminer l'époque à laquelle seront réunies les conditions les plus favorables pour le déroulement d'un phénomène biologique : désinfection du sol, germination, repiquage.

5. — Température des racines et techniques culturales

Le régime thermique du sol peut être modifié en régulant l'apport et la perte de chaleur et en changeant les propriétés thermiques du sol. Mais dans la pratique agricole courante, le contrôle de la température au niveau des racines apparaît difficile à mettre

en œuvre. Néanmoins, il est possible d'influencer dans une certaine mesure la température du sol en contrôlant son humidité et en utilisant le paillage. Mais seules, les cultures sous abris permettent un contrôle efficace de ce facteur du milieu par le chauffage du sol ou la mise en œuvre des cultures hors sol.

5.1. — *Humidité du sol. Irrigation et drainage*

Un sol humide reste habituellement plus froid qu'un sol sec à cause de la forte chaleur spécifique de l'eau et de l'évaporation qui absorbe de la chaleur. En outre, un sol sec répond plus rapidement à une modification des conditions thermiques extérieures qu'un sol humide (Richards *et al.*, 1952).

L'humidité du sol peut être modifiée par diverses pratiques culturales dont l'irrigation et le drainage.

Ainsi dans l'Arizona, la température du sol est réduite jusqu'à une profondeur de 90 cm à la suite d'une irrigation et cet effet disparaît ensuite au cours des 2 semaines qui suivent l'apport d'eau (Cooper, 1973). Cependant, si le rythme d'irrigation est inférieur à ce laps de temps, on peut maintenir une température plus basse dans le profil du sol. L'irrigation réduit la température du sol aussi bien en utilisant de l'eau froide que de l'eau chaude et la plus forte réduction de température se produit 36 h après l'irrigation. Cette action peut avoir un effet très défavorable sur la croissance des plantes au printemps quand la température du sol n'a pas encore atteint un niveau suffisant. Ainsi, en Camargue, le semis direct du Riz pose des problèmes difficiles à cause de la température insuffisante de l'eau d'irrigation provenant du Rhône. De même, en Californie, le rendement du Riz a diminué dans la vallée du Sacramento parce que les eaux d'irrigation ont une température voisine de 8 °C (45 °F). Par contre, l'utilisation d'eau froide est favorable pour les cultures sensibles aux températures de sol trop élevées, comme la Laitue ou les Fraisiers (Wierenga et Mc Hagan, 1966).

En Libye, les eaux de certains puits artésiens peuvent sortir à une température voisine de 60 °C. Aussi, le refroidissement de ces eaux à une température convenable doit être effectué avant leur utilisation pour l'irrigation.

L'influence de la pluie ou de l'eau d'irrigation sur les modifications à court terme du profil thermique dépend essentiellement de la température du sol au moment de l'application de l'eau. Si les horizons supérieurs du profil sont plus chauds que les horizons profonds, il en résulte un refroidissement en surface et un réchauffement du sol en profondeur. Par contre, si la partie superficielle du sol est plus froide, l'abaissement de température se produit sur tout le profil. Quand le profil de température est uniforme, les modifications provoquées par l'apport d'eau sont très réduites. Mais en général, un apport d'eau provoque un abaissement de la valeur du maximum et du minimum à cause de la chaleur spécifique élevée de l'eau.

5.2. — *Paillage du sol*

L'influence du paillage sur la température du substrat dépend de nombreux facteurs parmi lesquels le matériau employé et l'époque d'utilisation sont particulièrement importants.

La paille de Blé, les tiges de Maïs, la sciure et la laine de verre provoquent une diminution de la température des racines du fait de leur propriété isolante et du pou-

voir de réflexion élevé (Verma et Kohnke, 1951 ; Shetty, 1964). Par contre, l'utilisation du polyéthylène noir et transparent, de bitume et du papier Kraft conduisent à une élévation des températures minimum et maximum qui peut atteindre plusieurs degrés (Clarkson, 1960 ; Liptay et Tiessen, 1970 ; Ballif et Dutil, 1971 ; Cornillon, 1974*b*). L'effet du polyéthylène transparent s'explique par « l'effet serre » avec transmission presque complète de la radiation qui est absorbée par le sol. Le film de polyéthylène noir, le bitume et le papier absorbent fortement l'énergie solaire ce qui conduit à une élévation de leur température. La transmission de cette chaleur au sol dépend de la température du film et du contact établi entre le sol et le matériau.

Les matériaux isolants provoquent une élévation de la température en hiver et une réduction en été par un abaissement des échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère ambiante (Jacks *et al.*, 1955). En juillet, la température peut dépasser 40 °C à environ 2 cm de profondeur sous un sol nu et ne pas atteindre 27 °C sous une paille de Blé ou des tiges de Maïs (Verma et Kohnke, 1951). Au cours de la journée, les différences entre sol nu et sol paillé sont variables mais en général cette différence est minimum au moment où le sol est le plus froid et devient maximum aux heures les plus chaudes de la journée en surface. A partir d'une certaine profondeur, cette variation journalière disparaît du fait de l'atténuation de l'onde thermique.

Au printemps, l'emploi du film plastique transparent permet une élévation de température de 4 à 5 °C à 10 cm de profondeur, ce qui accélère la croissance des plantes. Ainsi un film plastique dont la présence sur le sol est limité à 20 jours après la mise en place des plantes possède un effet comparable à un paillage permanent de la culture (Cornillon, 1974*b*). Mais le film plastique modifie aussi d'autres facteurs édaphiques parmi lesquels l'humidité et la teneur en nitrates sont particulièrement importantes. Il en résulte une augmentation de rendement qui dépend du type de matériau en place (tabl. 5) (Brun, 1968).

TABLEAU 5

Influence du paillage sur la production de l'Asperge et du Melon
(d'après Brun, 1968)

Influence of plastic mulch on asparagus and muskmelon yield
(from Brun, 1968)

Espèce	Témoin	Paillage	Paillage Polyéthylène		
		Chlorure de polyvinyle	transparent	gris fumé	noir
		(Rendement t/ha)			
Asperge	1,57	2,09	2,17	1,89	
Melon	14,3		29,5	27,0	21,6

5.3. — *Chauffage du sol*

Cette pratique est déjà fort ancienne puisque les couches naturelles ont toujours été utilisées par les horticulteurs et les maraîchers. Mais les thermosiphons enterrés sont utilisés depuis le début du siècle pour le forçage des asperges dans la vallée de la

Durance (Bordas, 1938). De même, le chauffage électrique basse tension a fait l'objet de nombreuses expérimentations en France et à l'étranger.

Actuellement, le chauffage du sol se développe rapidement avec divers systèmes dont les thermosiphons enterrés. La circulation d'eau chaude dans des gaines posées sur le sol et le chauffage électrique basse tension prennent une extension certaine en culture sous abris.

La comparaison du chauffage des serres par air pulsé, par des gaines posées sur le sol et par des tuyaux enterrés associés à l'air pulsé montre des réactions variables selon l'espèce (Wacquant *et al.*, 1977). Le chauffage du sol se traduit par un effet défavorable sur la nouaison de la Tomate. Par contre, le Melon réagit favorablement au chauffage du sol avec une augmentation de la précocité de récolte et du rendement global. Mais Boxall (1962) a montré que la température du sol doit se situer à un minimum de 16 °C pour obtenir une croissance normale de la Tomate.

Le système de chauffage par gaines modifie profondément le régime de température du système air-sol par rapport au système classique.

L'air est beaucoup plus chaud dans les 30 premiers cm ; par contre, il devient nettement plus froid à partir de 1 m. Aussi, les plantes exigeantes en chaleur et conduites en cordon vertical subissent des contraintes importantes.

Le réchauffement du sol est très important sous les gaines chauffantes, surtout dans l'horizon situé entre 0 et 15 cm qui concerne la zone où le développement du système radiculaire est maximum en serre.

En plein champ, des essais ont mis en évidence l'effet favorable du chauffage du sol sur la production de légumes. En effet, l'utilisation de l'eau chaude rejetée par les centrales électriques modifie le rythme de production de l'Asperge, de la Fraise et de la Pomme de terre (Guillermin *et al.*, 1976). La récolte s'effectue avec 1 à 2 mois d'avance sur les parcelles chauffées avec des thermosiphons enterrés par rapport aux parcelles témoins non chauffées. De même, Rykbost *et al.* (1975) ont obtenu une amélioration de récolte comprise entre 19 p. 100 pour les Haricots et 100 p. 100 pour les Choux broccoli (tabl. 6). Naturellement, en plein champ, le problème de la rentabilité des installations se pose en relation avec le revenu brut des cultures établies.

TABLEAU 6

Influence du chauffage du sol sur la production de diverses cultures maraîchères
(d'après Rykbost *et al.*, 1975)

Influence of soil heating on yield of differents vegetable crops
(from Rykbost *et al.*, 1975)

Espèce	Témoin	Sol chauffé
	Rendement t/ha	
Broccoli	2,28	4,86
Tomate	59,0	77,3
Haricot blanc.....	5,0	6,4
Fraisier	15,7	21,1
Poivron	6,32	8,74

5.4. — *Culture hors sol*

La simplicité apparente de la culture hors sol et les résultats remarquables obtenus dans certains cas ne doivent pas cacher les risques liés à la nature du substrat et aux conditions de milieu surtout quand on cultive la même espèce durant toute l'année.

Parmi ces facteurs, la température des racines apparaît particulièrement importante dans la zone méditerranéenne avec un niveau insuffisant en hiver et au début du printemps, mais aussi avec des excès préjudiciables aux cultures pendant la période estivale.

Les réactions de la plante aux modifications des températures racinaires dépendent de la présence ou de l'absence d'un substrat ayant des propriétés thermiques qui modifient le profil de température. L'emploi d'un substrat (tourbe, pouzzolane, vermiculite) provoque l'apparition d'un gradient thermique entre les différentes parties du système racinaire. Par contre, l'utilisation de la technique du film nutritif conduit à exposer toutes les racines à une même température, celle de la solution nutritive.

Cappaert *et al.* (1976) ont observé la distribution des températures sur des profils de vermiculite, de perlite et d'argile expansée quand on applique une température uniforme au fond du bac. Cette étude a mis en évidence que l'humidité du sol ne possède aucune influence sur le profil de température qui varie entre 12 °C et 16 °C en surface et 22 °C et 27 °C à 12,5 cm de profondeur. Par contre, la quantité d'eau appliquée à chaque irrigation influence fortement la distribution des températures. On a intérêt à irriguer souvent avec une faible dose d'eau pour éviter un refroidissement trop important sur tout le profil et permettre ainsi au substrat de garder une température suffisante. Ainsi quand les cultures ont des exigences élevées en ce qui concerne la température des racines, comme le Concombre, on peut arroser avec des eaux relativement froides sans dommage pour la plante. Quand on applique une faible dose d'eau sur le substrat, l'abaissement de température observé est beaucoup plus faible.

La technique du film nutritif pose de graves problèmes en région méditerranéenne pendant l'été. En effet, la température de la solution nutritive s'équilibre rapidement à une valeur voisine de celle relevée dans l'air. Aux heures les plus chaudes de la journée, la solution nutritive peut atteindre une température de 38 °C et, pendant la nuit, elle descend à environ 18 °C. Ainsi la plante est soumise non seulement à l'effet des températures très élevées mais aussi à des gradients nycthéméraux très importants (Brun, 1979).

6. — Conclusion

Cette revue bibliographique nous a permis de noter l'influence de la température du sol sur la croissance et le développement des plantes et les modifications que subit ce facteur du milieu sous l'action des techniques culturales.

La réaction des plantes à une modification de la température des racines dépend de l'espèce et aussi de la variété. Il paraît particulièrement intéressant de connaître la plage de température pour laquelle la croissance et le développement du végétal sont optimums. Mais il est très important de connaître les facteurs qui limitent la croissance de la plante à faible et à forte température.

Au champ, une certaine modification de la température peut être obtenue au niveau des racines par l'emploi du paillage et par celui du modelé du sol. Ainsi l'utilisation de film plastique transparent permet en Provence de gagner 4 à 5 °C à 10 cm de profondeur, ce qui provoque une accélération de la croissance des plantes au printemps procurant une meilleure précocité des récoltes.

Sous abris, le chauffage du sol prend de plus en plus d'importance parce que le praticien s'est aperçu que ce facteur limite fortement la croissance des plantes en hiver et au printemps. Actuellement, l'apparition des cultures hors sol permet de contrôler efficacement la température des racines. Mais des problèmes se posent avec l'emploi de la technique du film nutritif parce que la température de la solution s'équilibre rapidement avec celle de l'air. Aussi au printemps, on relève des températures excessives au niveau des racines et le gradient de température entre les racines et la partie aérienne est modifié, ce qui peut poser des problèmes d'équilibre physiologique entre les différents organes du végétal.

Reçu pour publication en décembre 1979.

Remerciements

Je remercie vivement MM. P. Gouny (Directeur de Recherches I.N.R.A.) et E. Jolivet (Directeur du Laboratoire d'étude du Métabolisme intermédiaire et de Nutrition minérale, I.N.R.A., Versailles) pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et les conseils qu'ils m'ont donnés lors de la rédaction de ce mémoire.

Abstract

Root temperature, growth and development of plants

Bibliographical Review

Various cultivation techniques, such as the surface relief, plastic mulch, soil-heating and soilless culture, can alter the temperature of roots.

Therefore, information on the process of the soil temperature is of good value to agronomists and growers interested in broadening the period of growth of many species of plants.

From the assumptions made, many authors believe that temperature is very important in its action on phase-transition phenomena taking place in cytoplasmic membranes. Modifications of the fatty acid composition enable the plant membranes to retain the utmost fluidity.

Zusammenfassung

Temperatur der wurzeln und wachsen der pflanzen

Kurze Überschrift

Die Temperatur der Wurzeln kann durch verschiedene landwirtschaftliche Bodenarbeitungomethoden geändert werden, zum Beispiel : die Bodenstruktur, das plastische Beflechten des Bodens, die Heizung des Bodens, und die Bestellung in einer Nährlösung.

Die Kenntnis der Wirkungsart dieses edaphischen Faktors ist sehr anziehend für die Landwirte und die Praktiker die um eine Erweiterung des Produktionskalenders mehrerer Pflanzen sich bekümmern.

Unter den ausgedrückten Annahmen, finden wir sehr oft die TemperatureinfluB auf die Phasenübergänge in den cytoplamischen Membranen.

Die Veränderungen der Fettzusammensetzung erlauben die Membranen der Pflanze eine höchste FlüBigkeit zu behalten.

РЕЭЮМЕ

Библиографическое обозрение зависимостб роста и развития растений от температуры корней.

КОРНИЛЬОН П .

Разные техники возделывания/рельеф почвы, отопление почвы, гидропоника/могут изменить температуру почвы.

Поэтому знание способа действия этого эдафического фактора представляет большой интерес для агрономов и практиков, занимающихся расширением календаря возделывания многих растений.

По мнению многих авторов, большую роль играет температура, действующая на явления перехода фазы, которые происходят в плазматических оболочках. Изменения состава липидов позволяют растительным оболочкам сохранить максимальную вязкость.

Références bibliographiques

ABDEL HAFEEZ A. T., HARSSEMA H., VERI G., VERKERK K., 1971, Effects of soil and air temperature on growth, development and water use of tomatoes. *Neth. J. Agric. Sci.* **19,** 67-75.

ABD EL RAHMAN A. A., KUIPER P. J. C., BIERHUIZEN J. F., 1959. Preliminary observations on the effect of soil temperature on transpiration and growth of young tomato plants under controlled conditions. *Meded Landbouwhogeschool, Wageningen* **59,** 1-12.

AHMAD M., CAILLOUX M., 1971. Effects of some respiratory inhibitions on water flux in root hairs of Avena sativa. *Canad. J. Bot.* **50,** 575-579.

BALLIF J. L., DUTIL P., 1971. Effet d'un film de matière plastique sur la culture du maïs en champagne crayeuse. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **57,** 286-302.

BALLIF J. L., DUTIL P., 1974. Utilisations de films plastiques photodégradables pour la culture du maïs en Champagne crayeuse. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **60,** 389-401.

BALLIF J. L., DUTIL P., 1975. Le réchauffement des sols de craie par films plastiques. Mesures et bilan thermique. *Ann. agron.*, **26,** 159-167.

BARLOW E. W. R., BOERSMA L., YOUNG J. L., 1977. Photosynthesis, transpiration and leaf elongation in corn seedlings at suboptimal soil temperature. *Agron. J.* **69,** 95-100.

BARR W., PELLETT H., 1972. Effects of soil temperature on growth and development of some woody plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **97,** 632-635.

BAVER L. D., GARDNER W. H., GARDNER W. R., 1972. *Soil physics*, J. Wiley, New York, pp. 253-283.

BOHNING R. M., LUSANANDANA B., 1952. A comparative study of gradual and abrupt changes in root temperature on water absorption. *Plant Physiol.*, **27,** 475-488.

BORDAS J., 1938. Le chauffage du sol en horticulture. *L'Eclaireur Agricole et Horticole*, 3-12.

BOXALL, 1962. Some effects of soil temperature on growth of Tomato. *XVI Intern. Hort. Congress* II, 259-265.

BROUWER R., VAN VLIET G., 1960. De invloed van de wortel temperature op groei en opmane bijerwten. *Mededeling* 108 *van hiet*, IBS, 23-36.

BRUN R., 1968. *Utilisation des films souples plastiques dans le sud de la France.* S.E.I., 1-15.

BRUN R., 1969. Communication personnelle.

CAILLOUX M., 1971. Metabolism and the absorption of water by root hairs. *Cand. J. Bot.*, **50,** 557-573.

CANHAM A. E., 1958. Soil temperature and plant growth. *XV Inter. Hort. Congress*, 440-451.

CANNELL G. H., BINGHAM F. T., LINGLE J. C., GARBES M. J., 1963. Yield and nutrient composition of tomatoes in relation to soil temperature, moisture and phosphorus levels. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27,** 560-565.

CAPPAERT I., VERDONCK O., de BOODT M., 1976. Temperature evolution in inert substrates. I.W.O.S.C. *Proc.* 4th *Int. Congr. Soilless Cult.*, 313-321.

CLARKSON V. R., 1960. Effect of black polyethylene mulch on soil and microclimate temperature and nitrate level. *Agron. J.*, **52,** 307-309.

COOPER A. J., 1973. Root temperature and plant growth. *C.A.B. East Malling Kent*, **4,** 1-72.

CORNILLON P., 1974*a*. Comportement de la tomate en fonction de la température du substrat. *Ann. agron.*, **25,** 753-777.

CORNILLON P., 1974*b*. Effet d'une couverture plastique du sol sur une culture de tomate. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **60,** 857-866.

CORNILLON P., 1977. Effet de la température des racines sur l'absorption des éléments minéraux par la Tomate. *Ann. agron.*, **28,** 409-423.

COX L. M., BOERSMA L., 1967. Transpiration as a function of temperature and soil water stress. *Plant Physiol.*, **42,** 550-556.

CRAFTS A. S., CURRIER H. B., STOCKING C. R., 1949. *Water in the physiology of plants*, pp. 1-20. Ronald Press Co., New York.

DELVALLE C. G., HARMON S. A., 1967. Collard growth and mineral composition as influenced by soil temperature and two fertility levels. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **91,** 347-352.

DE VILLELE O., 1975. *Evolution des températures dans le sol dans la région d'Avignon.* Note technique M 75-1.

EHRLER W. C., 1963. Water absorption of alfalfa as affected by low root temperature and other factors of a controlled environment. *Agron. J.*, **55,** 363-366.

FINN B. J., MACK A. R., 1964. Differential response of orchard grass *Dactylis glomerata* L.) to nitrogen and phosphorus under controlled soil temperature. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 782-785.

FROTA J. N. E., TUCKER T. C., 1972. Temperature influence on ammonium and nitrate absorption by lettuce. *Soil Sci. Soc. Amer, Proc.*, **36,** 97-100.

GERLOFF E. D., RICHARDSON T., STAHMANN M. A., 1966. Changes in fatty acids of Alfalfa roots during cold hardening. *Plant Physiol.*, **41,** 1280-1284.

GRENIER G., MAZLIAK P., TRÉMOLIÈRES A., 1973. Influence du froid sur la synthèse des acides gras dans les racines de deux variétés de luzerne, l'une résistante et l'autre moins résistante au froid. *Physiol. Vég.*, **11,** 253-265.

GROBBELAAR W. P., 1963. Responses of young maize plants to root temperature. *Meded Landbouwhogeschool Wageningen*, **63,** 1-68.

GUILLERMIN P., DELMAS J., GRAUBY A., 1976. Utilisation agricole des rejets thermiques d'origine industrielle. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **62,** 775-793.

GUINN G., HUNTER R. E., 1968. Root temperature and carbohydrate statues of young cotton plants. *Crop Sci.*, **8,** 67-70.

HARRIS P., JAMES A. T., 1969. The effect of low temperature on fatty acids biosynthesis in plants. *Biochem. J.*, **5,** 325-330.

HIGGINS P. D., SPOMER G. C., 1976. Soil temperature effects on root respiration and the ecology of alpine and subalpine plants. *Bot. Gaz.*, **137,** 110-120.

JACKS G. V., BRIND W. D., SMITH R., 1955. *Mulching.* Tech. com., **49,** C.A.B. Buchs England, 24-29.

JENSEN G., 1960. Effects of temperature and shifts in temperature on the respiration of intact root systems. *Physiol. Plant.*, **13,** 822-830.

KOZLOWSKI T. T., 1964. *Water metabolism in plants.* Harper and Row. London.

KRAMER P. J., 1942. Species differences with respect to water absorption at low soil temperature. *Amer. J. Bot.*, **29,** 828-832.

KRAMER P. J., 1956. *Physical and physiological aspects of water absorption.* Encycl. Plant. Physiol., **3,** 124-159, Springer Verlag, Berlin.

KUIPER P. J. C., 1963. Some considerations on water transport accross living cell membranes. *Connecticut Agric. Exp. Station* 664, 59-68.

KUIPER P. J. C., 1964*a*. Water uptake of higher plants as affected by root temperature. *Meded Landbouwhogeschool, Wageningen*, **64,** 1-11.

KUIPER P. J. C., 1964*b*. Water transport accross root cell membranes : effect of alkenylsuccinic acid. *Science*, **143,** 690-691.

KUIPER P. J. C., 1969. Surface active chemicals, membrane permeability and resistance to freezing. *Proc. First Intern. Citrus Symp.*, **2,** 593-595.

LEHNINGER A. L., 1970. *Biochemistry*, pp. 189-214 et 513-537, Worth publishers Inc., New York.

LIEBIG G. F., CHAPMAN H. D., 1963. The effect of variable root temperatures on the behaviour of young navel orange trees in a greenhouse. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, **82,** 204-209.

LIPTAY A. M., TIESSEN H., 1970. Influences of polyethylene coated paper mulch on soil environment. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **95,** 395-398.

LYONS J. M., WHEATON T. A., PRATT H. K., 1964. Relationship between the physical nature of mitochondrial membranes and chilling sensitivity in plants. *Plant Physiol.*, **39,** 262-268.

MARTIN G. C., WILCOX G. E., 1963. Critical soil temperature for tomato plant growth. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27,** 565-567.

MADEC P., PERENNEC P., 1955. Les possibilités d'évolution des germes de la pomme de terre et leurs conséquences. *Ann. Amél. Plantes*, **5,** 555-574.

MADEC P., 1956. La nature et les causes du boulage chez la pomme de terre. *Ann. Amél. Plantes*, **6,** 151-169.

MAYBERRY K. S., RAUSCHKOLB R. S., 1975. Nitrogen uptake in midwinter Lettuce. *Calif. Agric.*, **29,** 6-7.

MEES G. C., WEATHERLEY P. E., 1957. The mechanism of water absorption by root. The role of hydrostatic pressure gradients accross the cortex. *Proc. Soc. B.*, **147,** 381-391.

MORAGHAN J. T., PORTER O. A., 1975. Maize growth as affected by root temperature and form of nitrogen. *Plant and soil*, **43,** 479-487.

NIELSEN K. F., HALSTEAD R. L., McLEAN A. J., 1960. Effects of soils temperature on the growth and chemical composition of lucerne. *Proc.* 8th *Int. Grassland Cong.*, 287-292.

NIELSEN K. F., HALSTEAD R. L., McLEAN A. J., BOURGET S. J., HOLMES R. M., 1961. The influence of soil temperature on the growth and mineral composition of corn, bromegrass and potatoes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25,** 369-372.

NIELSEN K. F., HUMPHRIES E. C., 1966. Effects of root temperature on plant growth. *Soils and fertilizers*, **29,** 1-7.

PERRIER A., 1975. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. *Ann. agron.*, **26,** 139-157.

PROEBSTING E. L., 1957. The effect of soil temperature on the mineral nutrition of strawberry. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **69,** 278-281.

RAJAN A. K., 1964. The effect of root temperature on water and sulphate absorption in intact sunflower plants. *J. Exp. Bot.*, **17,** 1-19.

RALEIGH G. J., 1941. The effect of culture solution temperature on water intake and wilting of the muskmelon. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, **38,** 487-489.

REYES D. M., STOLZY L. H., LABANANSKAS C. K., 1977. Temperature and oxygen effects in soil on nutrient uptake in Jojoba seedlings. *Agron. J.*, **69,** 647-650.

RICHARDS S. J., HAGAN R. M., McCALLA T. M., 1952. Soil temperature and plant growth, pp. 303-479 in « *Soil physical conditions and plant growth* », Agronomy vol. 2,Ed. B. T. Shaw, Acad. Press.

RISSER G., CORNILLON P., RODE J. C., AUGE M., 1978. Effet de la température des racines sur la croissance de jeunes plants de diverses variétés de Melon (*Cucumis melo* L.). *Ann. agron.*, **29,** 453-473.

RYKBOST K. A., BOERSMA L., MACK H. J., SCHMISSEUR W. E., 1975. Yield response to soil warming : vegetable crops. *Agron. J.*, **67,** 738-743.

SHETTY B. S., 1964. *Effects of polyethylene film mulches and sawdust on the vegetative and reproductive behavior of red rich strawberry plants.* Thesis, University of Minnesota.

SINGH N. T., CHAUDHARY T. N., SINGH G., 1971. Water absorption by seeds as affected by soil temperature. *Plant and Soil*, **35,** 189-192.

SLATYER R. O., 1967. *Plant water relationships*, pp. 198-236. Acad. Press, London.

STEPHENS L. C., WIDMER R. E., 1976. Soil temperature effects on Cyclamen flowering. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **101,** 107-111.

UNGER P. W., DANIELSON R. E., 1967. Water relation and growth of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as influenced by nutrient solution temperature. *Agron. J.*, **59,** 143-146.

VERMA A. B. S., KOHNKE H., 1951. Effects of organic mulches on soil conditions and soybean yields. *Soil Sci.*, **72,** 149-156.

WACQUANT C., RASSENT E., MUSARD M., ODET J., 1977. *Influence du chauffage du sol sur le développement et la production d'une culture conduite à plusieurs régimes de température d'ambiance.* Brochure I.N.V.U.F.L.E.C., 390-63, 1-20.

WALKER J. M., 1969. One degree increments in soils temperatures affect maize seddling behavior. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **33,** 729-736.

WIERENGA P. J., McHAGAN R., 1966. Effects of cold irrigation water on soil temperature and crop growth. *Calif. Agric.*, **20,** 14-16.

YAMAGUCHI M., PAULSON H. N., KINSELLA M. N., BERNHARD R. A., 1975. Effects of soil temperature on growth and quality of onion bulbs (*Allium cepa* L.) used for dehydration. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **100,** 415-419.

Ann. agron., 1980, **31** (1), 85-105

Liaisons entre la morphologie du brin, le rendement de l'épi et les composantes du rendement chez le blé tendre

I. — Effet variétal

R. DELECOLLE et J. C. GURNADE [1]

Station de Bioclimatologie
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Les relations entre la morphologie du brin et le rendement en grain de l'épi sont étudiées pour une année et un lieu donnés sur neuf variétés de blé tendre cultivées en plein champ. Sur des brins pris au hasard, la morphologie est quantifiée à la floraison et à la récolte par les longueurs et les diamètres des entrenœuds de la tige, par la longueur de la gaine et la surface du limbe de la dernière feuille, par les diamètres des quatrième et cinquième nœuds. Le rendement-épi est mesuré par ses composantes. La structure interne aux caractères morphologiques est étudiée par l'analyse en composantes principales ; les rapports entre morphologie et rendement par les coefficients de corrélation simple et la régression orthogonale.

Le col de l'épi est la source principale de variabilité intravariétale et régularise la hauteur totale de la tige. Le rendement est lié surtout aux diamètres de la partie supérieure de la tige, par l'intermédiaire des composantes déterminées plus précocement. La surface du limbe de la dernière feuille n'apparaît pas un facteur limitant. Par les critères morphologiques mesurables à la floraison, on peut prévoir entre 40 et 90 p. 100 du rendement-épi d'une parcelle.

1. — Introduction

L'élaboration des potentialités de l'épi de blé et celle de la morphologie du brin qui le porte sont concomitantes. Il est donc logique de rechercher les relations existant éventuellement entre ces phénomènes, afin de savoir quelle place peut tenir la modélisation des phénomènes de croissance dans un modèle général de prévision du comportement et du rendement du blé.

Le premier objectif est alors d'appréhender la part variétale dans la variabilité observée des caractères morphologiques et dans leurs liaisons avec la production de grain de l'épi.

La présente étude se propose de rechercher, pour un lieu et une année donnés, l'existence de ces relations, leur force ainsi que leur constance au sein de neuf variétés et de deux traitements azotés, en mettant en évidence les corrélations liant entre eux

[1] Stagiaire I. T. C. F.

les caractères morphologiques du brin, en explicitant les relations entre ceux-ci et le rendement-épi par l'intermédiaire des composantes de ce rendement, et en tentant d'expliquer les variations de rendement observées à la récolte par les caractères morphologiques mesurables à la floraison.

2. — Etude bibliographique sommaire

Les études concernant les rapports entre morphologie et rendement chez les céréales, et particulièrement chez le blé, comparent généralement, et opposent parfois, la part prise dans la variabilité du rendement, d'un côté par les composantes de ce rendement (nombre et poids des grains, nombre d'épillets, etc...), et de l'autre par des composantes strictement morphologiques (hauteur de la tige, surfaces foliaires, etc...).

Ces études sont la plupart du temps l'œuvre de généticiens à la recherche de caractères ayant à la fois une forte liaison avec le rendement, et une forte héritabilité, au travers de croisements diallèles. Les relations ainsi mises en évidence sont le fruit de l'examen de coefficients de corrélation phénotypique et d'analyses multidimensionnelles (régression, analyse factorielle) sur les moyennes de chaque lignée parent ou issue du croisement.

Seul à notre connaissance, Ledent (1977*a*) se préoccupe de rechercher les relations entre morphologie et rendement de l'épi à l'intérieur d'un ensemble de brins génétiquement homogènes, et d'examiner si ces corrélations sont constantes entre les variétés.

Relations entre caractères morphologiques et rendement-épi

Notons d'abord la corrélation positive observée, sur chacune de trois variétés de blé tendre d'hiver, entre rendement par épi et poids sec total de la tige sans épi (Ledent, 1977*a*). Law *et al.* (1978) observent une corrélation également positive entre hauteur de la tige et rendement, mais entre les lignées résultant d'un croisement diallèle entre quatre variétés de blé d'hiver. En revanche, cette corrélation n'est pas significative pour Grignac (1973) qui étudie quinze lignées F_6 à F_9 de blé dur ainsi que trois variétés-témoins. La longueur du col de l'épi est reliée positivement au rendement de l'épi sur vingt-cinq cultivars de blé tendre d'hiver d'après Croy *et al.* (1978) ainsi que d'après Grignac (1973), mais reliée négativement d'après Hsu et Walton (1971) qui travaillent sur les lignées issues d'un croisement diallèle sur cinq variétés de blé tendre de printemps.

De la même façon, Grignac (1973) indique une concordance positive entre le rendement par épi et le rapport de la longueur du col de l'épi à la longueur totale de la tige, ainsi qu'une concordance négative entre le rendement par épi et le rapport du diamètre du col de l'épi à celui du cinquième nœud de la tige.

La longueur de la gaine de dernière feuille présente une corrélation positive avec le rendement par épi entre les lignées de blé de printemps étudiées par Walton (1971). Ce résultat apparaît également dans les coefficients de corrélation phénotypique que Rehman-Chowdry *et al.* (1976) calculent sur des lignées issues des croisements de quatre variétés de blé tendre d'hiver. Il en va de même pour le poids sec de cette gaine (Ledent, 1977*a*).

En revanche, la hauteur de l'épi au-dessus de la gaine est un facteur défavorable (Walton, 1971 ; Hsu et Walton, 1971). La longueur de l'épi est positivement corrélée au rendement par épi sur blé tendre (Walton, 1971), sur blé dur (Grignac, 1973), et sur les triticales hexaploïdes F_3 issues de croisements diallèles étudiés par Kaltsikes (1974). Ledent (1977*a*) indique une corrélation négative du nombre d'épillets par unité de longueur.

Enfin, pour ce qui est de la dernière feuille, les résultats sont assez contradictoires, ce qui s'explique peut-être par la diversité des matériels utilisés : Walton (1971), Hsu et Walton (1971) attribuent un rôle favorable à la largeur de la feuille. Sur triticale, Kaltsikes (1974) parvient à la conclusion opposée. Ledent (1977*a*), Grignac (1973), Rehman-Chowdry *et al.* (1976), Croy *et al.* (1978) ne constatent aucune influence significative sur le rendement par épi et McNeal et Berg (1977), travaillant sur cinq croisements de blé tendre de printemps, qualifient la surface de la dernière feuille de « mauvais indice de performance de la plante ».

3. — Matériel et méthodes

3.1. — *Matériel biologique et types de mesures*

Les mesures ont été pratiquées en juin et juillet 1978 à Gréoux-les-Bains (Alpes-de-Haute-Provence) sur huit variétés de blé tendre d'hiver (*T. aestivum* L.) et une variété de blé tendre alternatif, semées en parcelles expérimentales de 30 m², le 4 novembre 1977 ; parmi ces variétés, quatre ont été soumises à deux traitements azotés différents. Les treize traitements résultants sont décrits au tableau 1.

TABLEAU 1

Nom des variétés étudiées, date et nature des traitements azotés appliqués
Cultivars used in the experiment, dates and amounts of N supplies

Nom du traitement	Apports d'azote (kg/ha)		
	9/2/78 (tallage)	24/3/78 (début montaison)	19/4/7 (milieu montaison
Variétés d'hiver			
Talent 1		50	50
Talent 2	40	50	50
Courtot 1		50	50
Courtot 2	40	50	50
Top 1		50	50
Top 2	40	50	50
Capitole 1		50	50
Capitole 2	40	50	50
Etoile de Choisy	40	50	50
Moisson	40	50	50
Clément	40	50	50
Ducat	40	50	50
Variété alternative			
Chrismar	40	50	50

Les mesures pratiquées sur ce matériel végétal l'ont été à la floraison (tabl. 2*a*) et à la récolte (tabl. 2*b*).

A partir des données recueillies à la récolte, on a calculé les caractéristiques décrites dans le tableau 2*c*. Les mesures ont porté sur trente brins par traitement, choisis

TABLEAU 2*a*

Critères mesurés in situ à la floraison
Characters measured at flowering time

Définition des critères mesurés	Abréviations utilisées dans les figures
Surface de la dernière feuille.....	SDF
Diamètre du cinquième entre-nœud.....	DIAE5F
Diamètre du sixième entre-nœud (ou col de l'épi)	DIAE6F
Diamètre du quatrième nœud.....	DIAN4F
Diamètre du cinquième nœud.....	DIAN5F
Diamètre de la gaine de dernière feuille....	DIAGNF

TABLEAU 2*b*

Critères mesurés à la récolte
Characters measured at harvest

Définition des critères mesurés	Abréviations utilisées dans les figures
Longueur des entre-nœuds.....	LE1R, ..., LE6R
Longueur de la gaine de dernière feuille.....	LGNR
Diamètre du quatrième nœud | après dessi-	DIAN4R
Diamètre du cinquième nœud | cation	DIAN5R
Poids de grain par épi.....	RDT
Nombre de grains de l'épi.....	NBGR
Nombre total d'épillets.....	NBEPT

TABLEAU 2*c*

Critères calculés d'après les mesures à la récolte
Characters derived from measurements at harvest

Définition des critères calculés	Abréviations utilisées dans les figures
Longueur totale de la tige excepté le col de l'épi	ΣLE
Rapport du col de l'épi au cinquième entre-nœud	LE6/LE5
Rapport du col de l'épi au reste de la tige...	LE6/ΣLE
Nombre moyen de grains par épillet pour chaque épi.....	NGR/EPT
Poids moyen d'un grain pour chaque épi...	PD1GR (= RDT/NBGR)

au hasard dans toutes les strates de hauteur de tige, en éliminant toutefois les tiges porteuses d'épis stériles. Ces brins furent repérés et marqués à la floraison, puis repris à la récolte.

3.2. — *Méthodes d'interprétation des résultats*

Le principe des méthodes employées sera rappelé chaque fois qu'il sera nécessaire dans le chapitre concernant les résultats.

4. — Résultats

4.1. — *La structure interne des caractères morphologiques*

Pour une même variété semée dans une parcelle homogène, la variabilité morphologique observée entre plantes se manifeste de façon plus marquée sur certains caractères que sur d'autres. Il s'établit donc une hiérarchie de variabilité entre ces caractères.

Ces derniers, d'autre part, sont plus ou moins liés entre eux. C'est l'ensemble formé par cette hiérarchie et ces liaisons que nous appellerons structure.

Afin de visualiser cette structure, les critères morphologiques ont été traités par l'analyse en composantes principales normées, variété par variété.

Cette méthode est maintenant d'un emploi courant : on trouvera un exposé détaillé de son principe dans Lebart et Fénelon (1975), et des exemples d'application dans Dyer (1975), Hsu et Walton (1971), Walton (1971).

Disons brièvement que cette analyse permet d'obtenir, à partir d'un tableau contenant les réponses centrées et réduites d'un certain nombre d'individus à plusieurs critères, des axes dits axes factoriels ou composantes principales, que l'on associe deux à deux en plans factoriels où l'on projette, avec une distorsion minimum, des points représentatifs des individus étudiés. On peut également faire figurer sur chaque plan des points représentatifs des critères : c'est cette seconde représentation qui nous intéressera, les individus (ici, les brins de blé) restant anonymes dans l'étude.

La position de chaque point-caractère dépend, sur chaque plan, de la corrélation linéaire du caractère qu'il représente avec les axes factoriels (qui établissent une hiérarchie dans la variabilité) et, ce qui revient au même, avec les autres caractères. Pratiquement, un caractère est d'autant plus corrélé à un axe que son point représentatif est plus éloigné de l'origine et plus proche de cet axe. Enfin, à chaque axe est associé un pourcentage, qui est la part de la variabilité du tableau de départ extraite par cet axe : ce pourcentage est donc un critère de représentativité de chaque axe par rapport aux données initiales. (Notons d'un point de vue pratique que les critères sont représentés sur chaque graphique par leur abréviation, et la position réelle du point représentatif se trouve grossièrement au centre du groupe de signes de chaque abréviation).

Quatre exemples sensiblement différents et caractéristiques de structure intravariétale sont donnés à la figure 1 ; il s'agit des deux premiers axes factoriels relatifs aux variétés : Moisson, Courtot, Chrismar, Clément.

On remarquera d'abord que le pourcentage de la variabilité totale des données de départ que chaque plan extrait est à peu près constant (la somme des pourcentages extraits pour les deux axes s'étageant entre 55 et 65 p. 100).

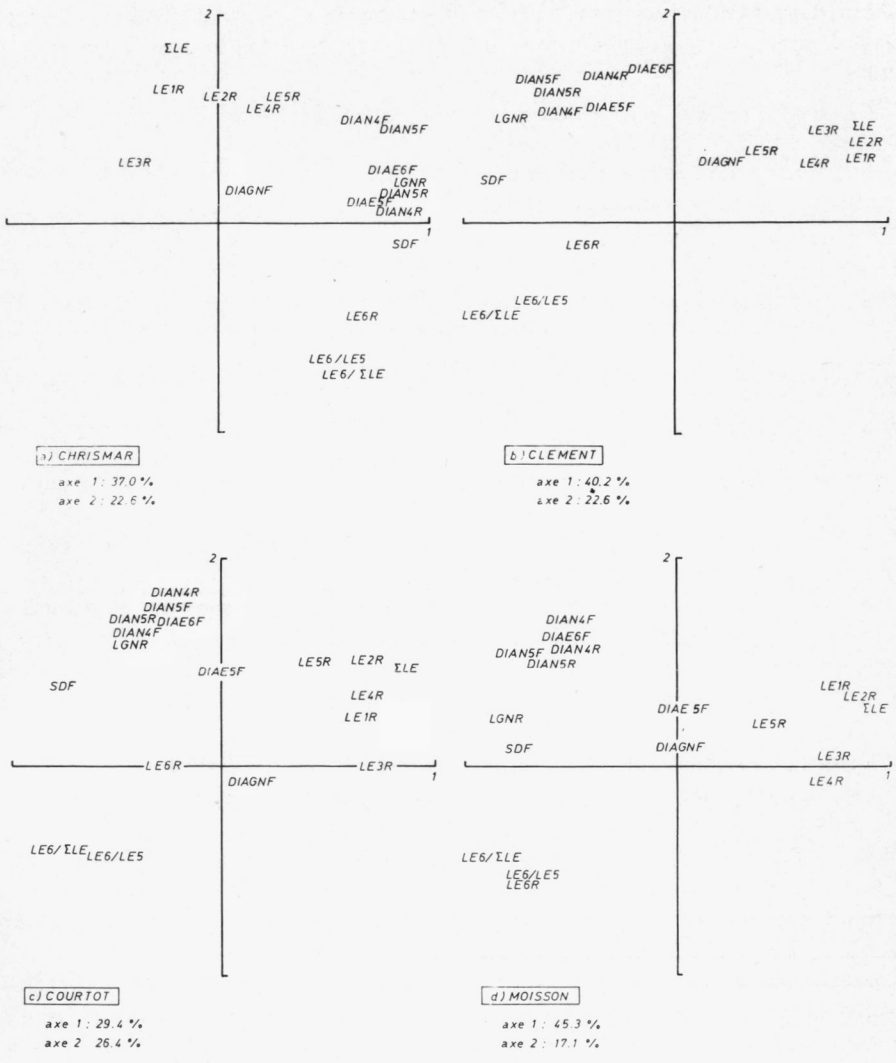


FIG. 1. — *Premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales des caractères morphologiques pour quatre variétés prises individuellement.*

Principal component analysis of morphological characters for four wheat varieties : graphical illustration of the correlation between morphological characters and the two first principal components.

La disposition des points représentatifs des caractéristiques morphologiques nous montre des constantes indépendantes de la variété :

a) L'opposition par rapport à l'origine entre les longueurs des cinq premiers entre-nœuds (LE1R... LE5R) et celle du col de l'épi (LE6R), ensuite la corrélation entre tous les diamètres (DIAE5F... DIAN5R), excepté celui de la gaine de dernière feuille (DIAGNF). Ces diamètres apparaissent sur un axe perpendiculaire, à l'origine, à celui qui oppose les longueurs d'entre-nœuds, ce qui signifie la non-corrélation linéaire entre les deux types de caractéristiques.

b) La longueur de la gaine de la dernière feuille (LGNR) est corrélée aux diamètres (DIA...) et à la surface du limbe de la dernière feuille (SDF), du côté des grandeurs relatives au col de l'épi (LE6R, LE6/ΣLE, etc...), et finalement opposée aux longueurs des premiers entre-nœuds. Le diamètre de la gaine de dernière feuille (DIAGNF) n'est fortement corrélé qu'au quatrième ou au cinquième axe factoriel, non représentés ici : il est linéairement non corrélé aux autres, quelle que soit la variété.

La comparaison entre les parties *a*, *b*, *c* et *d* de la figure 1 montre que ces groupes de critères sont absolument communs à toutes les variétés, mais peuvent se hiérarchiser différemment : ainsi, la variabilité interne à la variété est plutôt le fait des longueurs d'entre-nœuds pour certaines variétés (Courtot, Moisson), de leurs diamètres pour d'autres (Chrismar) ou est due aux deux à la fois (Clément). En examinant les résultats d'analyse en composantes principales relatifs à chacune des variétés étudiées, y compris celles qui ne sont pas représentées ici, on peut établir la classification arbitraire du tableau 3 ; les variétés y sont regroupées en fonction de la source principale de variabilité dégagée par l'analyse ; (1) : longueur des entre-nœuds ; (3) : diamètres de la partie supérieure de la tige ; (2) : structure intermédiaire entre les deux précédentes.

TABLEAU 3

Classification des variétés suivant leur principale source de variabilité
A classification among cultivars, using their main source of variability

(1) Longueur des entre-nœuds (LE.R)	(2) Intermédiaire	(3) Diamètre des nœuds et entre-nœuds (DIA...)
Talent 1	Talent 2	Chrismar
Courtot 1	Courtot 2	
Top 1	Top 2	
Capitole 1	Capitole 2	
Moisson	Choisy	
Ducat	Clément	

On remarque immédiatement le décalage de classe entre les traitements azotés des quatre premières variétés : nous reviendrons sur ce résultat.

Par convention, les résultats seront désormais présentés en respectant la hiérarchie des variétés définie ci-dessus.

4.2. — *Relations entre la morphologie du brin, le rendement-épi et ses composantes*

4.21. *Relation entre le rendement et ses composantes.*

On a considéré que le rendement-épi, ou poids de grain par épi, admettait la décomposition classique suivante :

RDT = nombre d'épillets × nombre de grains par épillet × poids d'un grain.

On remarquera cependant que, parmi ces trois composantes, seule la première est observée, puisque :

$$\text{Nombre de grains par épillet} = \frac{\text{Nombre de grains par épi}}{\text{Nombre d'épillets par épi}}$$

$$\text{Poids d'un grain} = \frac{\text{Poids de grain par épi}}{\text{Nombre de grains par épi}}.$$

Le tableau 4 regroupe les coefficients de corrélation linéaire simple entre le rendement-épi et ses composantes pour chacune des variétés étudiées. Ne sont indiqués sur ce tableau que les coefficients supérieurs en valeur absolue, au seuil de signification 1 p. 100, ceci pour éviter toute tentation d'interprétation, notamment par son signe, d'un coefficient non significativement différent de zéro.

TABLEAU 4

Coefficients de corrélation simple ($\times$ 1 000) *significatifs à* $P = 0{,}01$ *entre le rendement-épi et ses composantes* (voir signification des abréviations au tableau 2)

Significative correlation coefficients ($\times$ 1 000) *between spike yield and its components* (see Table 2 for shorterings)

Traitements	Variétés					
	RDT NGR/EPT	RDT PD1GR	RDT NBEPT	NBEPT PD1GR	PD1GR NGR/EPT	NEPT NGR/EPT
Talent 1.....	603	538	481			
Courtot 1.....	649	502				
Top 1.....	726	702		— 602		
Capitole 1.....	816					
Moisson	846					
Ducat	738					
Talent 2.....	758	753	521			
Courtot 2.....	933		511	— 464		
Top 2.....	880	470				
Capitole 2.....	892	439				
Choisy.....	828	483	718			
Clément	954					
Chrismar	869		580			

L'examen de ce tableau montre que la liaison linéaire la plus forte et la plus systématique s'établit entre le rendement-épi (RDT) et le nombre de grains par épillet (NGR/EPT). Moins intense, mais presque aussi systématique, est la liaison entre le rendement-épi et le poids d'un grain (PD1GR). Dans cette hiérarchie, le nombre d'épillets vient au troisième rang.

Les autres colonnes de ce tableau montrent que les relations linéaires entre les composantes du rendement-épi elles-mêmes sont presque statistiquement inexistantes.

4.22. *Relations entre morphologie du brin et rendement-épi.*

Dans ce qui suit, les relations entre les caractéristiques morphologiques et les diverses expressions du rendement sont exprimées sous deux formes complémentaires :

— les relations linéaires simples, comme précédemment, par l'intermédiaire des coefficients de corrélation ;

TABLEAU 5

Coefficients de corrélation simple (× 1 000) *significatifs à* $P = 0{,}01$ *entre rendement-épi et caractères morphologiques*
(voir signification des abréviations au tableau 2)

Significative correlation coefficients (× 1 000) *between spike yield and morphological characters*

Traitements	Variétés																
	LE2R	LE3R	LE4R	LE5R	LE6R	ΣLE	LE6/LE5	LE6/LE	LGNR	DIAE5F	DIAE6F	DIAGNF	DIAN4F	DIAN5F	DIAN4R	DIAN5R	SDF
Talent 1.....			471	568					531						556	584	
Courtot 1.....										534			640	592	680	729	
Top 1.....	602	535		518		568	— 471	— 480		577	542		667		774	786	
Capitole 1.....									695		672		626		687	685	
Moisson			— 492						490				520	520	475		
Ducat.....										480			742	464	759	549	
Talent 2.....									621		634		659	741	649	689	
Courtot 2.....											715		720	660	854	802	
Top 2.....									501	811	679		789	761	763	715	
Capitole 2.....			— 496						707	523	498		710	734	843	774	
Choisy			— 503						849	801	838		768	753	775	705	571
Clément										483			557	478			
Chrismar				502					794	690	786		724	842	602	718	613

— les relations linéaires multiples, en utilisant les caractères morphologiques comme variables explicatives du rendement-épi ou de ses composantes, par l'intermédiaire de régressions linéaires multiples.

La méthode de régression utilisée ici est la régression orthogonale (Tomassone, 1967). Celle-ci consiste, pour expliquer une variable en fonction de p autres, à soumettre d'abord ces p variables à une analyse en composantes principales, puis à utiliser $k \leqslant p$ des composantes principales extraites comme variables explicatives dans une régression linéaire qui leur affecte un jeu de coefficients à partir duquel il est aisé de repasser aux variables de départ. Les régressions effectuées sur l'ensemble des caractères morphologiques ($p = 17$) ont été réalisées sur les cinq premières composantes principales extraites ($k = 5$). Celles qui concernent les paramètres mesurables à la floraison ($p = 3$, cf. § 4.24) ont utilisé les trois composantes principales extraites ($k = 3$). Ces composantes principales étant orthogonales, elles permettent de s'affranchir dans une certaine mesure des corrélations existant entre les p variables explicatives de départ : ce point est important, puisque les hypothèses de base de la régression classique supposent l'indépendance de ces variables explicatives, et que la transgression de ces hypothèses peut entraîner des distorsions importantes dans les résultats (Marquardt et Snee, 1975 ; Hocking, 1977).

D'un point de vue pratique, on s'est abstenu de faire apparaître les composantes du rendement aux côtés de la morphologie dans ce type d'analyse ; le rendement et ses composantes sont liés par une relation algébrique, et l'intensité de leur corrélation l'emporte presque obligatoirement sur celle qui lie le rendement à la morphologie. A la limite, en introduisant les logarithmes du rendement et de ses composantes, on obtiendrait 100 p. 100 d'explication par la régression...

Corrélations simples.

Les coefficients de corrélation liant le rendement-épi aux caractéristiques morphologiques sont regroupés au tableau 5. On y constate immédiatement une hiérarchie dans l'intensité et l'aspect systématique des liaisons : les diamètres des quatrième et cinquième nœuds, à la floraison et à la récolte (DIAN4F, DIAN5F, DIAN4R, DIAN5R), présentent pour pratiquement toutes les variétés des corrélations assez fortes (en moyenne 0,6 à 0,7). Moins systématiques mais également fortes, sont les liaisons qui unissent le rendement-épi à la longueur de gaine de dernière feuille (LGNR) et aux diamètres des deux derniers entre-nœuds (DIAE5F, DIAE6F).

Les longueurs d'entre-nœuds, en revanche, sont très peu liées au rendement : on remarquera l'absence de liaison significative entre rendement et longueur du col de l'épi (LE6R). Le diamètre de la gaine de dernière feuille (DIAGNF), mesure très imprécise, ne montre aucune corrélation significative. Il est important de noter, enfin, que la surface du limbe de la dernière feuille (SDF) n'est pratiquement pas corrélée avec le rendement-épi.

Régression.

La signification individuelle des coefficients de régression orthogonale entre le rendement et les caractères morphologiques pour chaque variété est présentée au tableau 6. Y figure également la part R^2 de variance du rendement expliquée par chaque équation calculée. Ce tableau montre que les diamètres sont les variables les plus explicatives linéairement, notamment ceux des quatrième et cinquième nœuds,

TABLEAU 6

Signification individuelle et signe des coefficients des régressions orthogonales relatives au rendement-épi

Signs and individual significations of principal components regression coefficients for spike yield

Traitements	Variétés																	
	LE2R	LE3R	LE4R	LE5R	LE6R	ΣLE	LE6/LE5	LE6/ΣLE	LGNR	DIAE5F	DIAE6F	DIAGNF	DIAN4F	DIAN5F	DIAN4R	DIAN5R	SDF	R^2
Talent 1...			+++	+++		++			+++				+++		+++	+++		0,67
Courtot 1..										+++			+++	+++	+++	+++		0,66
Top 1.....	+++	+++		++		+++		−−		+	++		+++		+++	+++		0,83
Capitole 1.		++	++		++	+++			+++		+++		+++		+++	+++		0,73
Moisson ..	++	++	−−−		−−	++		−−−		+++			+++	+++	+++		++	0,71
Ducat									+++	+++		+	+++	+++	+++	++	+	0,72
Talent 2...		++				+			+++	++	++		++	+++	+++	+++	++	0,65
Courtot 2..	+++			—		+++	++	—			+++		+++	+++	+++	+++	++	0,86
Top 2.....	++					++			+++	+++	+++		+++	+++	+++	+++		0,84
Capitole 2.									+++	+++	+		+++	+++	+++	+++		0,68
Choisy	+++	+++				+++			+++	+++	+++		+++	+++	+++	+++	+++	0,90
Clément ..														+++	++	+++		0,41
Chrismar..						++			+++	+++	+++		+++	+++	+++	+++	+++	0,84

\+ (resp. —) : coefficient positif (resp. négatif) et significatif à P = 0,05
++ (— —) : coefficient positif (resp. négatif) et significatif à P = 0,01.
+++ (— — —) : coefficient positif (resp. négatif) et significatif à P = 0,001.

tant à la floraison qu'à la récolte (DIAN...). A un degré moindre, on trouve la longueur de la gaine et les diamètres des derniers entre-nœuds (LGNR, DIAE5F, DIAE6F). On remarquera que tous les coefficients en cause jusqu'à présent sont positifs.

La surface du limbe de dernière feuille (SDF) et les longueurs d'entre-nœuds (LER) ne sont pas systématiquement affectées de coefficients significatifs : on remarquera cependant le rôle de la longueur totale au-dessous du col de l'épi (ΣLE).

L'examen de la part de variance expliquée montre que celle-ci s'échelonne de 41 à 90 p. 100 suivant les variétés. Dans le cas de la variété Clément, on peut dire que les diamètres des nœuds supérieurs expliquent linéairement à eux seuls 41 p. 100 de la variance du rendement-épi.

Les résultats obtenus par la régression orthogonale sont donc très cohérents avec les coefficients de corrélation simple.

4.23. *Relations entre morphologie du brin et composantes du rendement.*

Nous nous limiterons ici à l'examen des coefficients de corrélation simple.

4.231. *Nombre d'épillets.*

Les coefficients relatifs à cette composante sont représentés au tableau 7.

On y constate d'abord le faible niveau général des corrélations (le plus souvent autour de 0,6). Les corrélations les plus systématiques se font avec la longueur de la gaine de dernière feuille (LGNR), le diamètre du col de l'épi (DIAE6F), et les diamètres des nœuds supérieurs (DIAN...). Ces corrélations sont systématiquement positives.

4.232. *Nombre de grains par épillet.*

Le tableau 8 regroupe les coefficients relatifs à cette composante. Les relations avec les longueurs d'entre-nœuds sont pratiquement inexistantes. Elles deviennent plus fréquentes avec les diamètres d'entre-nœuds (DIAE5F surtout), et la longueur de la gaine de dernière feuille (LGNR). Elles sont pratiquement systématiques avec les diamètres des nœuds supérieurs (DIAN...).

4.233. *Poids moyen d'un grain.*

Les coefficients correspondant au poids moyen du grain sont regroupés dans le tableau 9. L'examen de ce tableau montre que cette composante est très peu liée linéairement à la morphologie du brin, tant par l'intensité de la liaison que par sa fréquence.

Il apparaît donc en définitive que, parmi les composantes du rendement-épi, les plus liées à la morphologie du brin sont celles dont le déterminisme est le plus précoce (le nombre total d'épillets est fixé à la fin du stade B_2, le nombre de grains par épillet à la fécondation), et que les liaisons les plus fortes relient ces composantes aux diamètres mesurés sur la partie supérieure de la tige.

4.24. *Relations entre le rendement-épi, ses composantes et les caractéristiques morphologiques mesurables à la floraison.*

Les résultats suivants concernent les relations dégagées par la régression orthogonale entre le rendement-épi ou ses composantes et des caractéristiques morphologiques que l'on peut mesurer dès la floraison. On a choisi ici trois critères

TABLEAU 7

Coefficients de corrélation simple (× 1 000) *significatifs à P = 0,01 entre nombre total d'épillets et caractères morphologiques*
(voir les significations des abréviations au tableau 2)

Significative correlation coefficients (× 1 000) *between number of spikelets and morphological characters*

Traitements	Variétés																
	LE2R	LE3R	LE4R	LE5R	LE6R	ΣLE	LE6/LE5	LE6/ΣLE	LGNR	DIAE5F	DIAE6F	DIAGNF	DIAN4F	DIAN5F	DIAN4R	DIAN5R	SDF
Talent 1.....			540	542					589				660		578	552	
Courtot 1.....											643						
Top 1.....											609						
Capitole 1.....									540		627		538		534	585	
Moisson.....																502	
Ducat													556		579		
Talent 2.....									478		641		588	529	538	467	
Courtot 2.....											567		606				
Top 2.....									612	495	526		508	551	474	674	
Capitole 2.....											597						
Choisy									681	654	759		742	758	814	667	
Clément											927						
Chrismar			534						523		755		542	666	594	596	

TABLEAU 8

Coefficients de corrélation simple (× 1 000) *significatifs à P ≏ 0,01 entre nombre de grains par épillet et caractères morphologiques* (voir les significations des abréviations au tableau 2)

Significative correlation coefficients (× 1 000) *between number of grains per spikelet and morphological characters*

Traitements	Variétés																
	LE2R	LE3R	LE4R	LE5R	LE6R	ΣLE	LE6/LE5	LE6/ΣLE	LGNR	DIAE5F	DIAE6F	DIAGNF	DIAN4F	DIAN5F	DIAN4R	DIAN5R	SDF
Talent 1.....																	
Courtot 1....													544				
Top 1.....										622			550	649	578	515	
Capitole 1....													626		687	685	
Moisson			— 492							490			520	520	475		
Ducat															558	598	
Talent 2.....									537		522			547	602	594	
Courtot 2....											613		680	547	755	757	
Top 2.....										670			675	626	664	540	
Capitole 2....			— 574			— 496			772	488			648	707	791	734	
Choisy.....									614	531	601		636	605	597	576	522
Clément										460							
Chrismar				525					700	654	599		748	791		525	523

TABLEAU 9

Coefficients de corrélation simple (× 1 000) *significatifs à P* = 0,01 *entre poids moyen d'un grain et caractères morphologiques*
(voir signification des abréviations au tableau 2)

Significative correlation coefficients (× 1 000) *between grain mean weight and morphological characters*

Traitements	Variétés																
	LE2R	LE3R	LE4R	LE5R	LE6R	ΣLE	LE6/LE5	LE6/ΣLE	LGNR	DIAE5F	DIAE6F	DIAGNF	DIAN4F	DAN5F	DIAN4R	DIAN5R	SDF
Talent 1.....																	
Courtot 1.....																	
Top 1.....	534			510		505									482	481	
Capitole 1.....																	
Moisson.....																	
Ducat				516													
Talent 2.....													486	479			
Courtot 2.....																	
Top 2.....											502						
Capitole 2.....																	
Choisy			— 497						497	526							
Clément				557											546		
Chrismar																	

représentant chacun un degré d'intensité dans sa liaison avec le rendement, au vu des résultats précédents :

— la hauteur de la tige sous le col de l'épi (ΣLE) : liaison faible ;
— la longueur de la gaine de dernière feuille (LGNR), liaison moyenne ;
— le diamètre du quatrième nœud (DIAN4F) : liaison forte.

On se rappellera également que, dans la hiérarchie des critères morphologiques, ΣLE et DIAN4F étaient relativement indépendants, et permettaient, de par leurs positions respectives, de distinguer une typologie entre les variétés. Dans le cas présent, ces trois critères initiaux ont permis le calcul de trois composantes principales, qui ont toutes trois été utilisées comme variables explicatives synthétiques.

Cas du rendement-épi sensu stricto.

Les résultats relatifs au rendement lui-même sont présentés au tableau 10. La variable la plus explicative linéairement est le diamètre du quatrième nœud (DIAN4F). Des deux autres critères, c'est la hauteur du brin sous le col de l'épi (ΣLE) qui est le plus systématiquement significatif : ce résultat diffère de ce que l'on a obtenu jusqu'à présent. Les parts de variance expliquées, quoique inférieures à celles du tableau 6 pour la plupart des variétés, atteignent cependant des valeurs importantes dans le cas de Top 1 et d'Etoile de Choisy.

Cas des composantes du rendement-épi.

On trouve également dans le tableau 10 les résultats relatifs aux trois composantes du rendement-épi. La composante la mieux expliquée linéairement est le nombre de grains par épillet, et cette explication est due en majeure partie au diamètre du quatrième nœud (DIAN4F). Les deux autres composantes sont globalement moins bien expliquées, notamment le poids moyen d'un grain.

L'utilisation exclusive de caractères mesurables à la floraison conduit à une explication du rendement généralement inférieure à celle que l'on obtenait avec l'ensemble des critères morphologiques : cette différence reste cependant faible et variétale, et les composantes du rendement-épi qui jouent le rôle principal dans l'explication sont le nombre de grains par épillet et le nombre d'épillets.

Notons cependant que l'on observe des valeurs de R^2 supérieures à celles que l'on obtenait avec l'ensemble des critères morphologiques : cela s'explique par le nombre de composantes principales prises en compte dans les deux cas : cinq composantes pour dix-sept variables dans le premier, trois composantes pour trois variables dans le second : pour certaines variétés, la représentativité des cinq premières composantes principales apparaît donc trop faible.

5. — Discussion et conclusions

5.1. — L'analyse de la structure interne aux caractères morphologiques mesurés fait ressortir deux invariants. Le premier est l'opposition entre les longueurs des entre-nœuds inférieurs et celle du col de l'épi : à l'intérieur d'une variété donnée, toutes talles confondues, l'allongement du col de l'épi tend à régulariser la hauteur de la tige, et donc la hauteur de l'épi au-dessus du sol ; tout se passe comme si le dernier entre-nœud portait son épi vers la lumière, peut-être en compétition avec ses voisins.

TABLEAU 10

Signification et signe des coefficients des régressions orthogonales relatives au rendement-épi pour chaque variété
(Variables explicatives = caractères mesurés à la floraison)

Signs and individual signification of principal components regression coefficients for spike yield
(explicative variables being characters measured at harvest)

	Rendement épi				Nombre de grains par épillet				Nombre d'épillets				Poids du grain			
	ΣLE	LGNR	DIAN4F	R^2	ΣLE	LGNR	DIAN4F	R^2	ΣLE	LGNR	DIAN4F	R^2	ΣLE	LGNR	DIAN4F	R^2
Talent 1.....	++		+++	0,71				0,12			+	0,55				0,12
Courtot 1.....			+++	0,42			++	0,40				0,22			+	0,08
Top 1.....	+++		++	0,83	non calculé											
Capitole 1.....	+++	+++	+++	0,73	non calculé											
Moisson	++	+	+++	0,60			+	0,29	+	++		0,30				0,11
Ducat			+++	0,60			+	0,19			++	0,33				0,16
Talent 2.....	+	+	++	0,57	+	++		0,39			+	0,38			+	0,23
Courtot 2.....	+		+++	0,62	+		+++	0,55			++	0,44	+		—	0,31
Top 2.....	+		+++	0,70			+++	0,57		+		0,44				0,13
Capitole 2.....		++	++	0,66		++	+	0,66				0,12				0,07
Choisy	+++	+++	+++	0,90	+	+		0,55				0,60				0,30
Clément	+		++	0,45	+		+	0,34				0,17				0,23
Chrismar	+	+++		0,75		+	+	0,64				0,36		+	—	0,24

Le second invariant est une certaine indépendance entre les grandeurs précédentes et les autres caractéristiques de la partie supérieure de la plante (diamètre des derniers nœuds et entre-nœuds, longueur de la dernière gaine, surface de la dernière feuille). Ceci met en lumière le fait qu'on ne peut donner une relation simple entre la structure de la base de la plante et celle de sa partie supérieure, pour une variété donnée.

Chez la plupart des variétés étudiées, les longueurs d'entre-nœuds sont la source principale de variabilité, en partageant ce rôle avec les diamètres de la partie supérieure de la tige. Notons ici que la différence de structure observée entre les deux traitements azotés de quatre variétés (cf. § 4.11*b*) peut s'interpréter non comme une plus grande variabilité des diamètres due à un apport d'azote supplémentaire au tallage, mais plutôt par une plus faible variabilité des longueurs d'entre-nœuds, ce qui témoignerait d'un meilleur accomplissement des potentialités de croissance (Malet, 1979).

5.2. — Des relations apparaissent entre le rendement-épi et les caractéristiques des nœuds et entre-nœuds supérieurs de la tige, ainsi qu'avec la gaine de dernière feuille ; on ne peut cependant retrouver dans les réponses une gradation à mettre en parallèle avec la typologie variétale établie par l'étude des seules structures morphologiques. De la même façon, l'influence du niveau de nutrition azotée n'apparaît pas.

Pour mieux comprendre ces relations, utilisons les composantes du rendement-épi qui, étant dans notre étude presque parfaitement indépendantes entre elles, sont de bons descripteurs de ce rendement. Les composantes les plus concernées par ces liaisons sont celles qui sont déterminées le plus tôt dans la vie de la plante : le nombre d'épillets (déterminé au stade B) et le nombre de grains par épillet (déterminé à la fécondation).

Les diamètres des nœuds et des entre-nœuds étant les caractéristiques les plus corrélées à ces composantes, quels sont alors les facteurs influençant la valeur finale de ces diamètres ?

Il s'agit vraisemblablement d'un problème de taille des cellules, et donc d'alimentation. Le nombre de cellules-mères d'un nœud est, selon toute vraisemblance, fixé pendant la période de transition entre initiation florale et stade B, et, pour les nœuds supérieurs, n'entre en multiplication qu'à l'époque de l'apparition des ébauches de pièces florales (stades C).

L'omniprésence dans les corrélations significatives des diamètres des nœuds et entre-nœuds supérieurs trouve certainement une partie de son interprétation dans la discrimination entre maîtres-brins et talles dans la population de brins tirés au hasard : les maîtres-brins sont théoriquement favorisés dans leur alimentation hydrique et minérale, donc à la fois dans l'édification de leur morphologie et par les surfaces offertes ensuite aux flux minéraux.

N'oublions cependant pas qu'un maître-brin ne devient pas obligatoirement un brin dominant à la récolte (Gurnade et Malet, 1979), et que, d'autre part, la hauteur de la tige, maîtresse dans l'idée de dominance, n'apparaît pas comme un facteur lié au rendement et à ses composantes : on sort donc en partie du domaine des évidences.

Dans le même ordre d'idées, l'importance de la gaine de dernière feuille, déjà notée par Ledent (1974), peut s'interpréter par un apport décisif de photosynthèse de la part de cette gaine, ou par une relation fonctionnelle avec ce qui a été dit plus haut : des brins plus vigoureux (en diamètre) ont des gaines plus longues.

Le fait que le poids moyen du grain soit très peu lié aux caractéristiques morphologiques du brin est *a priori* surprenant, car on aurait pu s'attendre à trouver de plus gros grains sur un brin plus vigoureux ; d'autant que les assimilats de la dernière feuille doivent transiter par la région du cinquième nœud : leur acheminement vers l'épi semblerait facilité par une plus grande surface d'échange. L'indépendance observée tend donc plutôt à corroborer les résultats cités par Baldy (1973), qui mettent en lumière la part importante prise dans le remplissage du grain par les pièces florales de l'épi lui-même.

On peut en tout cas constater, au vu de l'absence de liaison linéaire entre poids moyen du grain et surface du limbe de dernière feuille, que celle-ci semble être suffisante pour l'alimentation, quels que soient la variété, l'alimentation azotée et le type de brin. Ce résultat est très compatible avec les travaux cités et réalisés par Ledent (1977*a* et 1977*b*), qui montre que l'amoindrissement des moyens de photosynthèse et de translocation de la dernière feuille ne conduit pas à une réduction spectaculaire du poids moyen du grain et qu'il en va de même de l'incision transversale partielle du col de l'épi.

Ces résultats, valables à l'intérieur d'une population de brins d'une même variété, et obtenus sous des conditions de rayonnement et d'alimentation hydrique très différentes, semblent montrer que l'assimilation de la dernière feuille et les translocations par le dernier nœud et le col de l'épi ne sont pas au premier rang des facteurs limitants de l'évolution pondérale du grain.

Cette conclusion est à opposer aux résultats cités par Planchon (1976) qui insiste sur le rôle photosynthétique déterminant de la dernière feuille dans le rendement final en grains : ce rôle se révélerait donc plutôt au niveau des comparaisons inter-variétales, ce qui n'est pas l'avis de McNeal *et al.* (1977) et de Rehman-Chowdry *et al.* (1976).

Ceci fait apparaître un point essentiel, évident, mais souvent négligé : dans ce type d'étude, les conclusions tirées dépendent fondamentalement des données analysées ; c'est ainsi qu'un critère, qui apparaissait pertinent au sein d'un premier groupe de grandeurs mesurées, peut perdre sa signification devant d'autres critères plus riches en information.

5.3. — L'utilisation exclusive des caractères morphologiques mesurables à la floraison permet, dans cette expérimentation, d'expliquer linéairement 40 à 90 p. 100 de la variabilité du rendement-épi suivant les variétés. Cela signifie, si ce résultat est stable sous d'autres conditions, que l'on peut avoir une connaissance assez précise du rendement-épi, dans une parcelle donnée, dès la floraison, en mesurant les critères les plus importants (longueur de la gaine de dernière feuille, diamètre du quatrième nœud, diamètre du cinquième nœud, par exemple).

Il est cependant évident que cette précision sera d'autant meilleure que la compensation du rendement-épi par le poids moyen du grain interviendra moins, et donc que l'histoire de la plante n'aura été ni trop, ni trop peu favorable aux composantes précocement déterminées, cette dernière condition ayant pour effet de rendre indépendantes entre elles les composantes du rendement.

Si l'on remarque enfin que la majeure partie de cette explication est due au diamètre du quatrième nœud, il paraît souhaitable, dans une optique prédictive, de mener à bien une modélisation de la croissance de cet organe en fonction des facteurs du milieu, toujours sous réserve que la liaison observée soit stable pour d'autres années d'expérience.

Summary

Relations between culm morphology, spike yield and yield components in wheat

I. — *Varietal effect*

Relations between culm morphology and spike yield are investigated on nine wheat varieties in field conditions.

Morphology is quantified on culms randomly sampled at flowering and harvesting, by means of lengths and diameters of the stem internodes, of length of the flag leaf sheath, and area of the flag leaf blade, of diameters of the fourth and fifth stem nodes. Spike yield is measured, and its components evaluated.

Principal components analysis is used to examine the internal structure of morphological characters ; correlation coefficients and principal components regression, to evidence the relations between morphology and yield. The last internode is the main source of within-variety variability, for it is a compensatory factor of stem height. Spike yield is mainly related to upper stem diameters through its earliest determined components. Flag leaf blade area is not a limiting factor, in the experiment's conditions. 40 to 90 p. 100 of spike yield could have been forecast by early measurable morphological characters.

Zusammenfassung

Zusammenhänge zwischen der morphologie des halms, dem ertrag der ähre und den ertragskomponenten beim weichweizen

I. — *Sortenspezifische wirkung*

Es wurden die Zusammenhänge zwischen der Morphologie des Halms und dem Ertrag der Ähre im Lauf eines Jahres und in einem gegebenen Ort, von neun im freien Felde gepflanzten Weichweizensorten untersucht. Auf Halme aus Stichproben wurde die Morphologie bei der Blüte, sowie bei der Ernte, mittels der Halmlängen und des Halmdurchmessers der Internodien, mittels der Länge der Blattscheide und der Spreitenfläche des letzten Blattes, mittels des Durchmessers der vierten und fünften Nodie, quantiziert. Der Ähreertrag wurde mittels deren Komponenten gemessen. Die innere Struktur der morphologischen Eigenschaften wurde mittels der Analyse der Hauptko mponenten untersucht, die Beziehung zwischen Morphologie und Ertrag mittels der Koeffizienten der einfachen Wechselbeziehung und mittels der orthogonalen Regression.

Der Ährenhals ist die Hauptquelle der Sortenvariabilität und regelt die Gesamthöhe des Halms. Der Ertrag ist vorallem mit dem Durchmesser des oberen Teils des Halms, mittels der am frühesten bestimmten Komponenten, in Verbindung. Die Spreitenfläche des letzten Blattes scheint kein begrenzender Faktor zu sein. Durch die bei der Blüte messbaren morphologischen Kriterien, können zwischen 40 und 90 % des Ährenertrags eines Grundstücks vorausgesagt werden.

РЕЭЮМЕ

Зависимость компонентов урожайности мягкой пшеницы от морфологии побега и урожайности колосьев.

I. Сортовой эффект.

ДЭЛЬКОЛЬ Р., ГУРНАД Ж.

Эависимость урожайности зёрен колоса от морфологии побега изучилась для определённого года и места на 9 сортах мягкой пшеницы, возделываемых в открытом грунте. На побегах, выбранных случайно, измерились во время цветения и урожая длина и диаметр междоузлий стебля, длина влагалища и поверхность пластинки последнего листа, диаметр четвёртого и пятого узла. Урожайность колосьев получилась из измерений её компонентов. Изучение внутренней структуры морфологических характеров состояло в анализе главных компонентов ; для изучения зависимости урожайности от морфологии употребились коэффициенты простой корреляции и ортогональная регрессия.

Главной причиной внутрисортовой изменчивости и регулирования высоты стебля является шейка колоса. Урожайность связана, прежде всего, с диаметром верхней части стебля через посредство компонентов, определённых ранее других. Поверхность пластинки последнего листа не служит ограничивающим фактором. Морфологические критерии, измеренные во время цветения, дают возможность предвидеть 40 до 90 % урожайности колосьев в определённом участке.

Références bibliographiques

BALDY Ch., 1973. Sur l'énergie active en photosynthèse. Son utilisation par des graminées au cours de leur développement. *Ann. Agron.* **24** (1), 1-31.

CROY L. I., OSMANZAI M., SMITH E. L., 1978. The relation of plant morphologic parts above the flag leaf node to yield and yield components in winter wheat. *Cereal Res. Commun.*, **6** (1), 21-33.

GRIGNAC P., 1973. Relation between yield, components of yield of durum wheat and certain morphological characters. *Proc. Sect. Cereals Euphytica. Symposium on Genetics and Breeding of durum wheat*, 14-18 mai 1973, 275-284.

GURNADE J. C., MALET Ph., 1979. Macrophysiologie de la maturation du blé d'hiver en conditions naturelles. I. Problèmes d'échantillonnage liés à l'origine et à la taille des brins (à paraître).

HOCKING R. R., 1977. The analysis and selection of variables in linear regression. *Biometrics*, **32** (1), 1-50.

HSU P., WALTON P. D., 1971. Relationships between yield and its components and structures above the flag leaf node in spring wheat. *Crop. Sci.*, **11,** 190-193.

KALTSIKES P. J., 1974. Application of multivariate statistical techniques to yield and characters associated with it in hexaploid triticale. *Z. Pflanzenzüchtg.*, **72,** 252-259.

LAW C. N., SNAPE J. W., WORLAND A. J., 1978. The genetical relationship between height and yield of wheat. *Heredity*, **40** (1), 133-151.

LEBART L., FENELON J. P., 1975. *Statistique et informatique appliquées*. 3e éd. Bordas, Paris, 439 p.

LEDENT J. F., 1977*a*. Relation entre rendement par épi et caractères morphologiques à maturité chez diverses variétés de blés d'hiver (*Triticum aestivum* L.). *Ann. agron.*, **28** (4), 391-407.

LEDENT J. F., 1977*b*. Effect of partial defoliation and vein cutting on grain growth and yield in winter wheat. *Bull. Soc. Roy. Bot. Belg.*, **110,** 239-250.

MALET Ph., 1979. Liaison statistique entre le développement et la croissance chez les plantes. I. Modèle simplifié pour l'analyse de la croissance de leurs organes. *Ann. agron.*, **30** (5), 415-430.

MARQUARDT D. W., SNEE R. D., 1975. Ridge regression in practice. *The American Statistician*, **29** (1), 3-20.

McNEAL F. H., BERG M. A., 1977. Flag leaf area in five spring wheat crosses and the relationship to grain yield. *Euphytica*, **26,** 739-744.

PLANCHON C., 1976. Essai de détermination de critères physiologiques en vue de l'amélioration du blé tendre : les facteurs de la photosynthèse de la dernière feuille. *Ann. Amélior. Plantes*, **26** (4), 717-744.

REHMAN-CHOWDRY A., SALEEM M., KHURSHID ALAM, 1976. Relation between flag leaf, yield of grain and yield components in wheat. *Expl. Agric.*, **12,** 411-415.

SMOCEK J., 1978. Relation drift between yield components in hybrid populations of winter wheat. *Cereal. Res. Commun.*, **6** (1), 43-54.

TOMASSONE R., 1967. Une méthode d'investigation : la régression orthogonale. *Ann. Sci. Forest.*, **24** (3), 233-258.

WALTON P. D., 1971. The use of factor analysis in determining characters for yield selection in wheat. *Euphytica*, **20,** 416-421.

Ann. agron., 1980, **31** (1), 107.

Chronique des livres

BOHM W. — *Methods of Studying Root Systems.* Berlin, Springer Verlag, 1979. 188 p.

Cet ouvrage rédigé par l'un des spécialistes de l'écologie des racines, présente clairement et de façon exhaustive (140 pages de texte, 1 000 références bibliographiques), les principales méthodes d'étude du système racinaire. Celles-ci sont regroupées selon huit grandes classes occupant chacune un chapitre. Les techniques et les problèmes généraux relatifs au lavage des racines ainsi que la mesure des principaux paramètres caractéristiques du système racinaire font l'objet de deux autres chapitres. La plus grande partie du livre est consacrée aux méthodes utilisées au champ (sept chapitres) et plus particulièrement aux méthodes classiques d'extraction (monolithes, carottes...). Les méthodes indirectes et notamment l'utilisation d'éléments radioactifs ne font l'objet que d'un seul chapitre, il en est de même pour les techniques utilisées au laboratoire. Bien que l'auteur indique les principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes, il n'est pas possible de comparer la précision et la difficulté (temps et matériels nécessaires) de mise en œuvre de chacune d'elles. Les illustrations sont bien choisies et complètent bien le texte. Cet ouvrage traite plus des méthodes de description du système racinaire que de celles qui permettent l'étude de son fonctionnement. Cependant il doit constituer un livre de référence pour toute personne qui aborde l'observation du système racinaire.

C. V. G.

FRENCH Norman. — *Perspectives in grassland ecology. — Results and applications of the US/IBP grassland biome study.*
Springer Verlag, New York (USA) Ed., Série « Ecological studies », Vol. 32, 1979.

Cet ouvrage donne le résumé et la synthèse des données collectées dans le « Grassland Biome Program » qui est une part de la contribution américaine au Programme Biologique International.

Après une introduction qui présente les types et les caractéristiques générales des prairies nord américaines, les dix chapitres peuvent être regroupés selon quatre thèmes :

— production primaire et facteurs qui la contrôlent ;
— influence des consommateurs aériens et souterrains ;
— cycle de l'azote et d'autres éléments nutritifs ainsi que modélisation des différents transferts ;
— interactions des différents sous-systèmes dans les écosystèmes prairiaux.

Compte tenu de l'ampleur de chaque chapitre, les auteurs ont choisi d'insister surtout sur une présentation synthétique des données et des relations entre chaque processus. Des bibliographies à chaque chapitre et un index final facilitent la consultation de cet ouvrage.

R. B.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et la*. A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

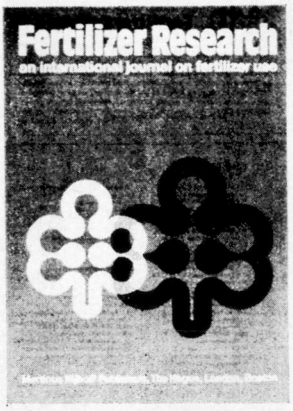
Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

new!

Fertilizer Research

an international journal on fertilizer use



Editor in Chief: P.F.J. van Burg, The Hague, The Netherlands

Editorial Board:
S.A. Barber (Lafayette, U.S.A.), N.J. Barrow (Wembley, Australia), T.E. Bates (Guelph, Canada), J.R. Burford (Hyderabad, India), D.M.B. Chestnutt (Hillsborough, U.K.), E.T. Craswell(Muscle Shoals, U.S.A.), A. Dam Kofoed (Vejen, Denmark), S.K. De Datta (Manila, Philippines), C. Demarquilly (Theix, France), K. Dilz (Haren, The Netherlands), A.P. Draycott (Higham, U.K.), O.P. Engelstad (Muscle Shoals, U.S.A.), H.J. Fiedler (Dresden, G.D.R.), J. Frame (Ayr, U.K.), Th. F. Gately (Wexford, Ireland), D.J. Greenwood (Warwick, U.K.), J. Hagin (Haifa, Israel), J.J. Hanway (Ames, U.S.A.), K. Harmsen (Aleppo, Syria), Ch. H. Henkens (Wageningen, The Netherlands), M.R.J. Holmes (Ipswich, U.K.), A.E.M. Hood (Bracknell, U.K.), R. Howeler (Cali, Colombia), N. Hrishi (Trivandrum, India), K. Isermann (Limburgerhof, F.R.G.), B.H. Janssen (Wageningen, The Netherlands), A.E. Johnston (Harpenden, U.K.), B.T. Kang (Ibadan, Nigeria), H. Kick (Bonn, F.R.G.), S. Larsen (Copenhagen, Denmark), C.K. Li (Nanking, People's Republic of China), E. Malavolta (Sao Paulo, Brazil), W. Matzel (Leipzig, G.D.R.), K. Mengel (Giessen, F.R.G.), K.R. Middleton (Hamilton, New Zealand), J. Morrison (Hurley, U.K.), M. Nyborg (Edmonton, Canada), J.J. Oertli (Zürich, Switzerland), R.A. Olsen (Lincoln, U.S.A.), R.L. Parfitt (Lower Hutt, New Zealand), J. Salette (Beaucouze, Franze), H. Stumpe (Halle, G.D.R.), P.L.G. Vlek (Muscle Shoals, U.S.A.), P.W.F. de Waard (Amsterdam, The Netherlands), M. Wessel (Wageningen, The Netherlands), R. Wetselaar (Canberra, Australia), D. Wilman (Penglais, U.K.).

Aims and Scope
FERTILIZER RESEARCH will provide a broad coverage of all topics of research concerned and connected with fertilizers and their use, in all areas of the world. Papers published will deal with the various aspects of fertilizer research in relation to soils and soil fertility, soil chemistry, crop and animal production and husbandry crop quality and environment. The studies may be concerned with agricultural, horticultural and plantation crops and forestry. The emphasis will be placed on papers presenting the results of original research. Occasional reviews will be published as well. All contributions will be in the English language. FERTILIZER RESEARCH will appear quarterly, starting in 1980.

Information for Contributors
Please send your contribution to the Editor-in-Chief:

Dr. P.F.J. van Burg
Landbouwkundig Bureau van
de Nederlandse Meststoffenindustrie
Thorbeckelaan 360
15e Etage
2564 BZ The Hague
The Netherlands

Instructions for authors are available from the Editor-in-Chief.

Subscription Information
Vol. 1, 1980 (4 issues):
For institutions, Dfl. 120.00 (approx. US $ 63.15), plus Dfl. 19.00 (approx. US $ 10.00) for postage and handling.
For individuals, Dfl. 79.00 (approx. US $ 41.60) including postage and handling.

Free sample copies are available upon request.

Contents of Vol. 1/1 and Vol. 1/2 (1980)
K.R. Middleton, The fertilizer economy of high-producing pastoral systems. A. Dam Kofoed, Copper and its utilization in Danish agriculture. K.M. Goh and P.E.H. Gregg, Re-utilization by perennial ryegrass *(Lolium perenne* L.) of labelled fertilizer sulphur incorporated in field-grown tops and roots of pasture plants added to soils. B.T. Kang, K. Moody and J.O. Adesina, Effects of fertilizer and weeding in no-tillage and tilled maize. J. Prummel, Fertilizer regime and changes in the phosphate and potash status of a silty marine clay soil during 25 years. M. Prasad and R. Prasad, Yield and nitrogen uptake by rice as affected by variety, method of planting and new nitrogen fertilizers. S.A. Barber, Twenty-five years of phosphate and potassium fertilization of a crop rotation. L.L. Hammond, S.H. Chien and J.R. Polo, Phosphorus availability from partial acidulation of two phosphate rocks. J.J. Oertli, Controlled-release fertilizers. W.H. Prins, Changes in quantity of mineral nitrogen in three grassland soils as affected by intensity of nitrogen fertilization.

ALLES KOMT TERECHT 4 M·N

Martinus Nijhoff Publishers

P.O. Box 566, The Hague, The Netherlands

Le Directeur de la publication : B. HURPIN

Imprimerie Jouve, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 6-1980

Dépôt légal : 2e trimestre 1980. N° d'Impression : 27028

CPPAP n° 1426-ADEP

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1980	France Prix T.T.C.	Étranger Prix net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix net
ANNALES AGRONOMIQUES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
APIDOLOGIE, 4 nos par an	100 F	175 F (sauf RFA)	30 F	50 F (sauf RFA)
* ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE				
** ANNALES DE ZOOLOGIE, ÉCOLOGIE ANIMALE				

* Les Annales de Biologie animale, Biochimie Biophysique deviennent : « Reproduction, Nutrition, Développement ».
** Les Annales de Zoologie, Ecologie animale cessent avec le n° 4, volume 11, 1979.
Les articles publiés dans cette série paraîtront désormais dans les *Œcologia, Applicata* de la revue : *Acta Œcologia*.
Pour ces 2 revues s'adresser à C.D.R. Gauthier-Villars, BP 119, 93104 MONTREUIL CEDEX. Tél. (1) 374.12.45.

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Utilisation par les ruminants des pâturages d'altitude et parcours méditerranéens. Xes Journées du Grenier de Theix.
576 p., 1979 ..... **110,00 F**

La Forêt et la Ville. Essai sur la forêt dans l'environnement urbain et industriel.
252 p., 1979 ..... **50,00 F**

Alimentation des ruminants. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants. Besoins alimentaires des animaux et valeur nutritive des aliments.
600 p., 1978 ..... **140,00 F**

Introduction à la statistique en biologie par **S. C. Pearce,** traduction de **J. P. Doazan.**
260 p., 1978 ..... **25,00 F**

L'I.N.R.A., l'eau et la production agricole
270 p., 1978 ..... **50,00 F**

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne. Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud par le Groupe de Recherches I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France, faunistique et biologie, par **H. Le Louarn** et **M. C. Saint Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

La Vache laitière. IXes Journées du Grenier de Theix.
342 p., 1977 ..... **60,00 F**

Amélioration génétique des animaux de ferme. Application aux bovins (sous la Direction de **B. Vissac**).
160 p., 1977 ..... **35,00 F**

Carte pédologique de la France à 1/1.000.000 par **J. Dupuis** ..... **96,00 F**

Cartes pédologiques de France à 1/100.000 ..... **96,00 F** (chacune)
(Vichy, Perpignan, Angoulême, Brives, Dijon, Toulon, Moulins, Condom, Tonnerre, Privas, St-Dié, Lesparre).

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français par **R. Cousin.**
111 p., et 140 fiches, 1974 ..... **168,50 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Auge, P. Allemand, R. Hames.**
144 p., 1973 ..... **63,50 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut National de la Recherche Agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1980, **31** (1), 1-107.

Table des matières

A. MORISOT. — Déplacement avec mélange des nitrates dans un matériau de porosité bimodale 1

P. VACHIER. — Identification des phénomènes intervenant lors du transport de solutés en solution aqueuse dans le milieu crayeux 19

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique.* Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. I. — Description du phénomène d'adsorption..... 33

P. CORNILLON. — *Etude bibliographique.* Incidence de la température des racines sur la croissance et le développement des plantes 63

R. DELECOLLE, J. C. GURNADE. — Liaisons entre la morphologie du brin, le rendement de l'épi et les composantes du rendement chez le blé tendre. I. — Effet variétal..... 85

Chronique des Livres 107

Contents

A. MORISOT. — Miscible displacement of nitrate in aggregated media..... 1

P. VACHIER. — Identification of the phenomena occurring during the transfer of aqueous-solution solutes in a chalky medium..... 19

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review.* Adsorption of pesticides by the soils and their constituents. I. — Description of the adsorption phenomenon 33

P. CORNILLON. — *Bibliographical review.* Root temperature, growth and development of plants. 63

R. DELECOLLE, J. C. GURNADE. — Relations between culm morphology, spike yield and yield components in wheat. I. — Varietal effect..... 85

Books review 107

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 10.036.001.5

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Trimestriel
1980
Vol. 31. N° 2

inra

AAG
31.2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 31 (2) 109-238 (1980)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., Paris Cedex 75231

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur de la Station de Biochimie et Physico-Chimie des céréales et de leurs dérivés C. E. R. D. I. A., le Noyer Lambert, 91300 Massy.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— F. GROSCLAUDE, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— J. ASSO, Station de Virologie, Immunologie, Route de Thiverval, 78850 Thiverval-Grignon.

Reproduction, Nutrition, Développement. Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante: C. N. R. Z. 78350 Jouy-en-Josas.

— Ch. THIBAULT.
— L. GUÉGUEN.
— G. PÉTRISSANT.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES. Tél. (3) 950-75-22

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Trimestriel

1980

Vol. 31. N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1980, **31** (2), 109-124.

Variations de la réserve facilement utilisable en eau du sol en relation avec différents facteurs écologiques

N. AHO (1), F.-A. DAUDET (2) et Nicole VARTANIAN (3)

(1) *Laboratoire d'Ecologie et de Bioclimatologie, I.N.A., 16, rue Claude Bernard, 75005 Paris*

(2) *Station de Bioclimatologie, I.N.R.A., Domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg*

(3) *Laboratoires d'Ecologie, Université de Paris XI, 91405 Orsay, et du Phytotron, C.N.R.S., 91190 Gif-sur-Yvette*

Résumé

La courbe de variation de l'évapotranspiration ETR en fonction de l'humidité du sol amène à distinguer la gamme d'humidité facilement utilisable où ETR = ETM (portion II de la courbe fig. 1) et la gamme d'humidité plus faible (portion III, fig. 1) où ETR inférieure à ETM est limitée au flux d'eau limite Q_{lim} accessible aux racines.

La présente étude vise à préciser les facteurs de variations de ces deux gammes. Elle a été réalisée sur deux espèces mésophytes (blé et moutarde), cultivées en pots sur deux types de sols (limon et sable, tabl. 1), et soumises en enceintes contrôlées à différentes conditions climatiques (tabl. 2).

Les variations constatées d'ETM (paliers des courbes des fig. 4 et 5) sont dues en grande partie aux différences de surfaces foliaires, lesquelles dépendent de l'âge de la plante mais aussi du pouvoir évaporant de l'air durant la période de croissance préalable (fig. 2 et 3). Quant aux droites $Q_{lim}(H)$ auxquelles on peut ajuster la portion de la courbe ETR = f(H) dans la gamme inférieure d'humidité (fig. 4 et 5), leur pente présente aussi d'assez grandes variations (fig. 6) ; mais celles-ci sont liées aux variations de densité racinaire (fig. 7), lesquelles dépendent, et de l'âge, et des conditions d'évaporation imposées au cours de la période de croissance (fig. 2 et 3).

Dans le cadre des expériences rapportées ici, les variations d'ETM et de α [pente de la droite représentative de la vitesse limite de dessèchement du sol $dH/dt_{lim} = f(H)$] se trouvaient corrélées de façon telle que les deux gammes d'humidité définies ci-dessus restaient à peu près constantes.

Liste des symboles

a	Pente de la droite représentative du débit limite d'extraction, $Q_{lim}(H)$.
β	Coefficient lié à la géométrie des racines.
D	Diffusivité hydraulique du sol.
da	Densité apparente du sol.
ETM	Evapotranspiration maximale.
ETP	Evapotranspiration potentielle.
ETR	Evapotranspiration réelle.
H	Humidité pondérale du sol.
Hc	Capacité au champ.
Hf	Point de flétrissement permanent.
HFU	Humidité facilement utilisable.
H_1	Borne inférieure de HFU.
Hr	Humidité de la proche rhizosphère.

HU Humidité utile.
dH/dt_{lim} Vitesse limite de dessèchement du sol.
ξ Pouvoir d'extraction de l'eau du sol par les racines.
λ Parcours moyen de l'eau entre la matrice du sol et les racines (volume du sol/surface totale des racines).
M Masse de sol explorée par les racines.
$Q_{lim}(H)$ Débit limite d'extraction de l'eau du sol par les racines.
RFU Réserve d'eau facilement utilisable.
RU Réserve d'eau utile.
ΔZ Profondeur d'enracinement.
pF Log_{10} du potentiel matriciel de l'eau du sol exprimé en cm d'eau.

Introduction

Depuis notamment les travaux de Kozlowski (1949), Lemée (1953) et Hallaire (1960), le problème de la disponibilité de l'eau du sol pour les plantes est souvent abordé à travers les concepts de réserve utile (R. U.) et de réserve facilement utilisable (R. F. U.).

Le concept de R. U. revient à représenter le sol comme un réservoir d'eau possédant une humidité maximum utile (la capacité au champ Hc), et une humidité minimum inexploitable (le point de flétrissement permanent Hf). Si ΔZ est l'épaisseur de sol directement prospectée par les racines, la R. U. s'exprime, en hauteur d'eau, par :

$$\text{R. U.} = \Delta Z \left(\frac{(Hc - Hf)}{100} \right) da \, . \qquad (1)$$

Dans cette expression Hc et Hf sont des humidités pondérales (g d'eau pour 100 g de sol sec), da est la densité apparente du sol en place, R. U. et ΔZ sont exprimés dans la même unité de longueur.

La R. F. U. est la fraction de la R. U. qui peut être utilisée par la plante sans que le niveau de transpiration soit diminué, ce qui pourrait constituer un critère commode d'appréciation des conditions optimales d'alimentation en eau.

Contrairement à la R. U., donnée purement statique, la R. F. U. fait intervenir les aspects dynamiques de la fourniture de l'eau du sol à la plante — conductivité hydraulique ou plus globalement, « mobilité » de l'eau du sol (Puech, 1969 ; Morizet et Millet, 1971). Les travaux de Hallaire (1960) ou de Denmead et Shaw (1962) ont pu montrer que la R. F. U. dépend en particulier de l'intensité de la demande climatique en eau (évapotranspiration potentielle ou ETP).

On sait toutefois que les valeurs limites Hc et Hf ne peuvent pas être définies de manière rigoureuse de sorte que leur intérêt dans la description des phénomènes de l'eau du sol est surtout qualitatif. La capacité au champ Hc est une donnée empirique difficile à corréler avec les caractéristiques texturales ou un potentiel hydrique déterminé ; l'aptitude de certaines cultures à dessécher le sol au-delà des — 15 bars du point de flétrissement permanent est désormais bien établie (Maertens *et al.*, 1974), de sorte que Hf est également entachée d'une certaine indétermination bien que dans une moindre mesure que Hc ; enfin, la grande variation de la densité des racines selon la

profondeur entraîne une exploitation très différenciée des réserves hydriques du sol dans le profil. On peut alors s'interroger sur l'intérêt de la notion même de réserve utile ou tout au moins sur son mode de calcul, dans le cas de cultures sèches.

Dans le cas de cultures irriguées, l'essentiel de l'eau provenant en fait d'un volume de sol limité aux horizons supérieurs (Maertens *et al.*, 1974) et abondamment prospecté par les racines, la notion de R. F. U. garde toute son importance. Elle correspond en effet à la dose d'irrigation théorique que l'on doit apporter à un sol et à une culture donnés pour n'avoir aucune perte d'eau par drainage, tout en maintenant la culture en conditions optimales d'alimentation hydrique. Malgré tout l'intérêt pratique d'une telle notion, on ne dispose encore que de rares indications sur les valeurs de R. F. U. à adopter. Des règles empiriques ont conduit à retenir des valeurs de l'ordre de R. U./3 à 2 R. U./3 suivant la texture du sol, mais on a rappelé que la R. F. U. doit être considérée comme fonction, en partie, de l'E. T. P. et que, par conséquent, une valeur unique de R. F. U. ne saurait être entièrement satisfaisante.

Nous ferons abstraction dans ce qui suit du problème de la profondeur d'enracinement ΔZ, de façon à nous limiter à l'étude de l'humidité utile (H. U. = Hc — Hf) et de l'humidité facilement utilisable H. F. U. Les expériences considérées ne porteront donc que sur des pots de profondeur limitée (12 à 15 cm), dans lesquels l'enracinement est à peu près homogène.

Pour des plantes ainsi cultivées et soumises à des conditions climatiques constantes, le fait de suspendre les apports d'eau conduit à un abaissement de l'humidité du sol. Les variations de l'intensité de transpiration qui s'ensuivent permettent d'étudier la relation entre transpiration et humidité du sol. Les expériences que nous rapportons ci-dessous (cf. fig. 4 et 5) font ainsi apparaître schématiquement et à des échelles de temps de l'ordre de la journée, trois phases successives dans l'utilisation de l'eau du sol (fig. 1) :

Phase I : la transpiration augmente quand le sol se dessèche.

Un effet dépressif de l'excès d'eau ne se produit généralement que pour des teneurs en eau supérieures à la capacité au champ (Hc) ; les causes peuvent en être recherchées soit au niveau des racines par suite d'une aération insuffisante (Vartanian, 1967) soit au niveau des stomates par fermeture hydropassive (de Parcevaux, 1964 ; Aho *et al.*, 1977).

Phase II : la valeur de la teneur en eau reste pratiquement sans effet sur la transpiration qui reste égale à ETM.

Les stomates sont ouverts, et le seul facteur limitant de la transpiration est la quantité d'énergie disponible au niveau des feuilles.

Phase III : la transpiration diminue lorsque le sol continue à se dessécher.

Cette réduction de transpiration traduit en fait une diminution des quantités d'eau extraites du sol par les racines, par suite d'un accroissement des différentes résistances au transfert d'eau. On peut donc interpréter cette portion de la courbe comme représentant également le débit maximum d'extraction d'eau du sol par le système racinaire en fonction de l'humidité du sol.

Il apparaît que la valeur de l'humidité H_1 qui, selon la définition de la H. F. U. que nous avons donnée, marque la limite inférieure de cette H. F. U., résulte de l'intersection de deux courbes (fig. 1) :

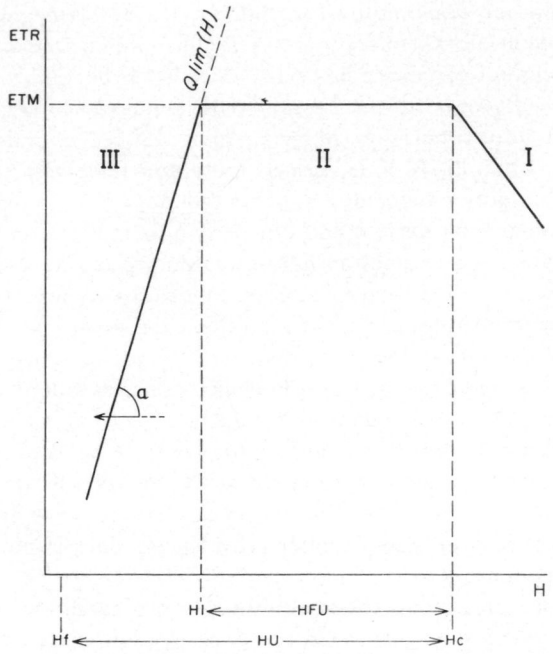


FIG. 1. — *Schéma d'évolution de la transpiration végétale en fonction de l'humidité du sol.*
Pattern of actual transpiration as a function of soil water content.

— la courbe $Q_{lim}(H)$ du débit limite d'extraction qui peut être considérée comme caractéristique du complexe « sol-racines »,

— l'horizontale E. T. M. qui caractérise, du point de vue hydrique, le complexe « climat-parties aériennes » de la plante.

On retrouve ainsi le fait que la R. F. U. dépend des éléments du sol, de la plante et du climat.

L'incidence des variations d'E. T. P. sur la R. F. U. résulte de ce schéma (déplacement de l'horizontale E. T. M.) ; elle a déjà été largement mise en évidence (Hallaire, 1960 ; Denmead et Shaw, 1962). Le travail de thèse (Aho, 1976) dont est issu le présent article se proposait d'étudier plus particulièrement l'incidence de la croissance des plantes sur la R. F. U.

La croissance conduit en effet à des modifications profondes des organes aériens et souterrains (nombre, dimensions, répartition, perméabilité à l'eau et aux gaz, ... etc) qui se traduisent par des déplacements des courbes $Q_{lim}(H)$ et E. T. M.

Ce qui précède montre que la connaissance des variations possibles de la R. F. U. au cours du cycle d'une culture doit s'appuyer sur deux études séparées :

— Variation de l'E. T. M. en fonction de la croissance des organes aériens ;

— Variation du débit limite $Q_{lim}(H)$ en fonction de la croissance du système racinaire.

Les informations déjà acquises sur le premier point et pour diverses espèces sont relativement abondantes. Le second point est moins bien connu, et c'est celui sur lequel nous insisterons davantage.

I. — Matériel et méthodes

Deux espèces mésophytes, le blé de printemps (*Triticum sativum* Lam.) à enracinement fasciculé et la moutarde blanche (*Sinapis alba* L.) à enracinement pivotant, ont été cultivées en conditions contrôlées de phytotron, dans des pots à section carrée de 15 cm de haut et 8 cm de côté.

Les substrats utilisés sont d'une part, le sable superficiel de la Plaine de La Solle (Forêt de Fontainebleau), d'autre part le limon de la Station d'Essais I. N. R. A. de La Minière (Yvelines). Leurs compositions granulométriques et les caractéristiques physiques et hydriques sont données dans le tableau 1. Les pots contiennent 1 400 g de sable ou 1 100 g de limon (valeurs données en poids secs).

TABLEAU 1

Composition granulométrique et caractéristiques physiques et hydriques du limon de La Minière et du sable de La Solle, dans les pots de culture

Substrat	Sable grossier (p. 100) (*)	Sable fin (p. 100)	Limon grossier (p. 100)	Limon fin (p. 100)	Argile (p. 100)	Porosité totale (p. 100)	da	Hc (p. 100)	Hf (p. 100)	H. U. (p. 100)
Limon	3,0	8,4	67,8	10,2	10,3	51,0	1,29	20,0	7,0	13,0
Sable	36,5	59,8	1,4	1,4	0,9	41,0	1,5	5,8	1,8	4,0

(*) p. 100 de matériau < 2 mm séché à 105 °C.

Après repiquage des plantules (une plantule par pot dans le cas de la Moutarde, cinq plantules dans le cas du Blé), le sol est maintenu à la capacité au champ $\pm$ 2 p. 100 d'humidité pondérale par des apports réguliers de solution nutritive et d'eau qui ramènent chaque pot à un poids constant (à une correction près qui tient compte de la croissance des plantes). Pendant cette première phase, les arrosages interviennent une à trois fois par jour selon le niveau de transpiration observé. La correction due à la croissance des plantes est calculée à partir d'une détermination hebdomadaire du poids frais total de dix plantes cultivées dans les mêmes conditions.

Lorsque les plantes ont l'âge requis (15 à 113 jours dans nos expériences), elles sont soumises à une période de dessèchement pendant laquelle tout apport d'eau est suspendu. La surface du sol est alors protégée de l'évaporation directe par un papier de « parafilm » de telle sorte que la perte de poids des pots soit totalement imputable à la transpiration. Elle indique d'autre part les variations de la teneur en eau moyenne du sol. Pour chaque pot, les pesées ont été faites chaque jour et à la même heure en fin de photopériode.

Les surfaces foliaires ont été déterminées soit par planimétrage optique, soit par

l'intermédiaire de corrélations précédemment établies avec la longueur et la largeur des feuilles.

Les longueurs racinaires ont été établies sur les racines principales et jusqu'aux ramifications d'ordre 3 par une mesure directe au double-décimètre.

Les conditions climatiques imposées aux plantes pendant les périodes de croissance ou de dessèchement ont été de trois sortes (tabl. 2).

TABLEAU 2

Conditions climatiques réalisées dans les salles de culture

Paramètres	Salle A	Salle B	Salle C
Photopériode (h)	16	12	16
Rayonnement global (Wm^{-2})	150	150	150
Température de l'air (°C)			
Jour	22	20	22
Nuit	22	16	22
Humidité relative de l'air (p. 100)	70	60	50
Vitesse du vent ($m.s^{-1}$)	0,4	1,5	0,4
Evaporation Piche (mmj^{-1})	3,5	5,4	7,5

A et C : Phytotron du C. N. R. S., Gif-sur-Yvette ;
B : Microphytotron de l'Institut National Agronomique, Paris.

Dans certains cas, les expériences de dessèchement ont eu lieu dans les mêmes salles que la croissance ; dans d'autres, un transfert de plantes entre les salles A et C a été opéré.

II. — Résultats

Tous les résultats, qu'ils portent sur la croissance et la morphologie des plantes ou sur les relations observées entre transpiration et humidité du sol, correspondent à des moyennes établies sur dix à vingt pots selon les cas. Les points expérimentaux, trop nombreux n'ont pas été reportés sur les figures ; l'intervalle de confiance est figuré par un trait vertical indiquant l'erreur standard moyenne.

1. — *Influence de l'humidité atmosphérique et de la nature du sol sur la morphologie des plantes*

Les paramètres étudiés au cours de la croissance sont : la biomasse des feuilles, la surface foliaire totale, la biomasse des racines et la longueur totale des racines (en cm par plante).

Les résultats sont représentés dans les figures 2 et 3.

Quel que soit le substrat, les plantes cultivées en atmosphère sèche ont une croissance pondérale foliaire et racinaire toujours plus faible qu'en conditions plus humides. Par contre, les longueurs de racines sont plus importantes en atmosphère sèche et sur sable qu'en milieu humide ou sur limon.

L'effet relatif de la sécheresse paraît affecter davantage la moutarde que le blé de printemps.

Ces observations semblent confirmer les hypothèses ou les résultats déjà acquis sur la réponse des deux espèces aux conditions de l'environnement (Janjatovic, 1968 ;

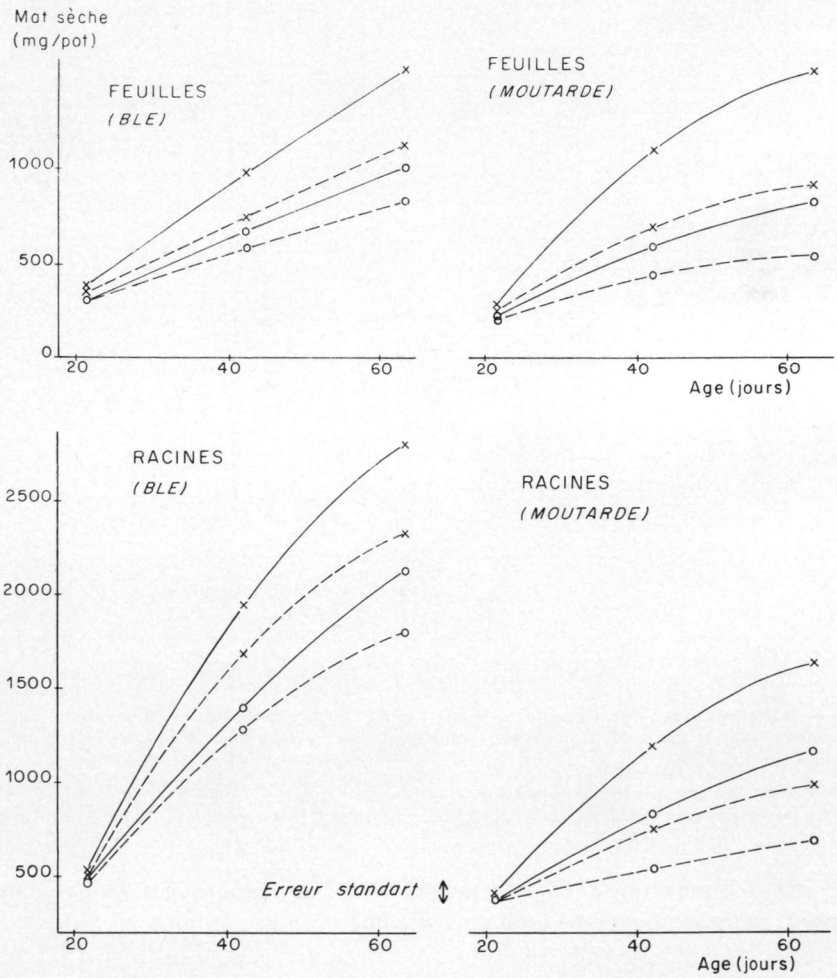


FIG. 2. — *Variations avec l'âge des masses foliaires et racinaires du blé et de la moutarde sur limon* (—) *et sur sable* (– – –), *pour deux conditions d'évaporation* : 3,5(x) *et* 7,5 (o) *mm.jour*$^{-1}$ (mesurées au Piche).

Changes in leaf and root dry weight of wheat and mustard during ageing on a loamy (——) *and sandy* (– – –) *soil, under two evaporative conditions* : 3.5(x) *and* 7.5(o) *mm.day*$^{-1}$ (measured with Piche evaporimeter).

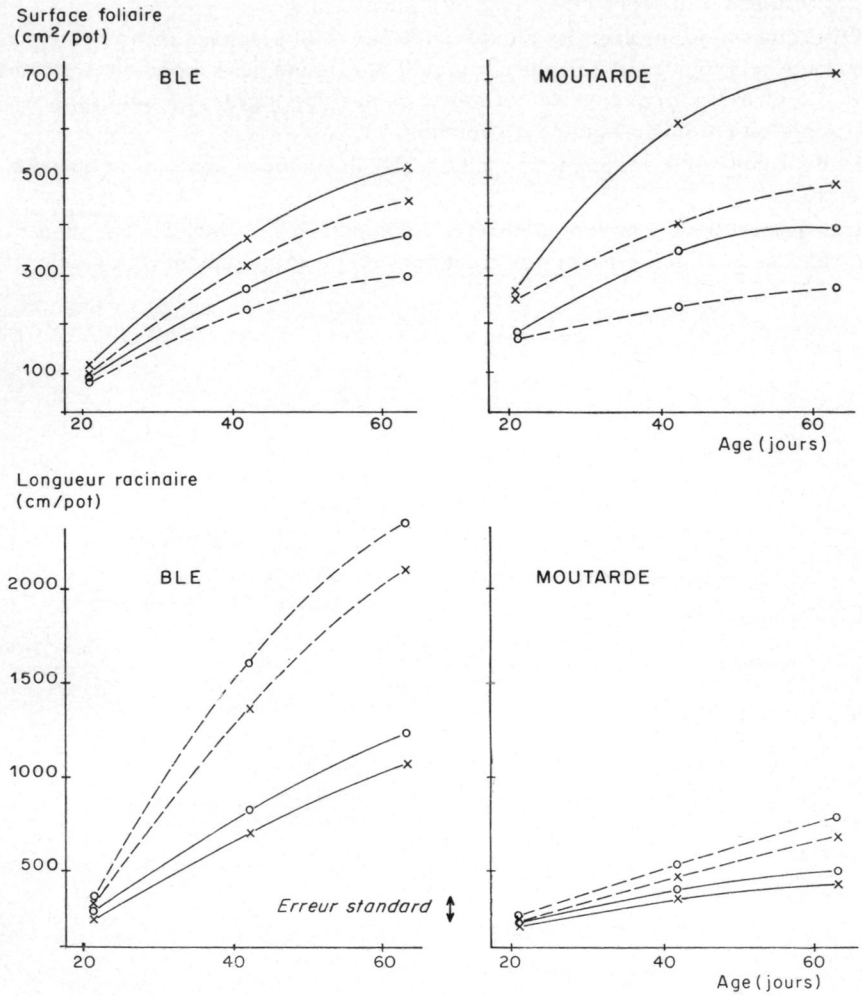


FIG. 3. — *Variations avec l'âge des surfaces foliaires et des longueurs racinaires du blé et de la moutarde, sur limon* (—) *et sur sable* (– – –), *pour deux conditions d'évaporation* : 3,5 (x) *et* 7,5(o) *mm.jour*$^{-1}$ (mesurées au Piche).

Changes in leaf area and root lenght of wheat and mustard during ageing in loamy (—) *and sandy* (– – –) *soil, under two evaporative conditions* : 3.5(x) *and* 7.5(o) *mm.day*$^{-1}$ (measured with Piche evaporimeter).

Scott-Russel et Sanderson, 1967 ; Vartanian, 1973). On remarque aussi que, dans ces conditions, la masse racinaire croît plus vite que la masse foliaire.

2. — *Influence de l'humidité atmosphérique et de l'âge de la plante sur l'E. T. M.*

A âge égal, qu'il s'agisse du blé ou de la moutarde, les paliers de transpiration observés en conditions optimales (E. T. M.) sont d'autant plus faibles que la croissance des plantes s'est effectuée en atmosphère plus sèche (fig. 4). Cela résulte de l'influence,

qui vient d'être signalée, de l'humidité de l'air sur la morphologie des plantes : l'accroissement de surface foliaire obtenu en atmosphère humide compense, et au-delà, la réduction du pouvoir évaporant de l'air, et se solde par un accroissement de la transpiration.

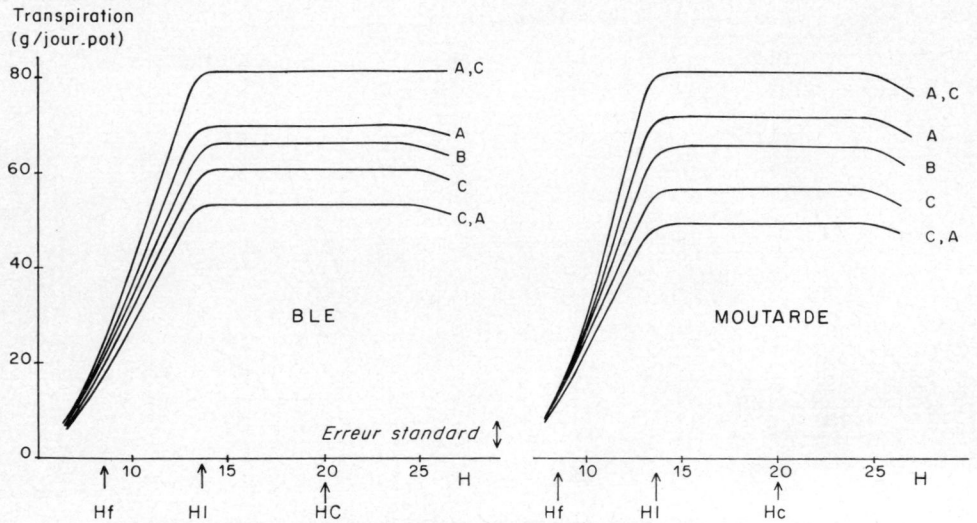


FIG. 4. — *Transpirations journalières du blé et de la moutarde de 63 jours, en fonction de l'humidité du sol* (limon) *pour 5 conditions d'évaporation :*

3,5 *mm.jour*$^{-1}$ *durant culture ; id. durant traitement* : A
5,4 *mm.jour*$^{-1}$ *durant culture ; id. durant traitement* : B
7,5 *mm.jour*$^{-1}$ *durant culture ; id. durant traitement* : C
3,5 *mm.jour*$^{-1}$ *durant culture ; 7,5 durant traitement* : A, C
7,5 *mm.jour*$^{-1}$ *durant culture ; 3,5 durant traitement* : C, A

Daily transpiration of wheat and mustard, 63 days old, as a function of soil water content (loam) *under five evaporative conditions :*

A : *grown and treated under* 3.5 *mm.day*$^{-1}$ (Piche)
B : *grown and treated under* 5,4 *mm.day*$^{-1}$ (Piche)
C : *grown and treated under* 7.5 *mm.day*$^{-1}$ (Piche)
A, C : *grown under* 3.5 ; *treated under* 7.5 *mm.day*$^{-1}$ (Piche)
C, A : *grown under* 7.5 ; *treated under* 3.5 *mm.day*$^{-1}$ (Piche)

La croissance de la plante s'accompagne d'une augmentation régulière du niveau d'E. T. M. au cours du temps (fig. 5). Pour le blé toutefois, une légère diminution de l'E. T. M. se manifeste à 113 jours, traduisant un certain vieillissement. Notons qu'à ce stade, les feuilles de blé ne manifestaient aucun signe de sénescence. Par contre, la moutarde au même âge (non représentée sur la figure) avait perdu toutes les feuilles de la tige principale.

Lorsque le traitement de dessèchement s'effectue dans des conditions différentes de celles de la croissance, les niveaux d'E. T. M. obtenus sont quelque peu modifiés par rapport aux précédents : le passage de plantes de Blé ou de Moutarde des conditions A aux conditions C entraîne un accroissement de l'E. T. M. d'environ 15 p. 100 (et inversement). On remarquera qu'il s'agit là d'une variation très faible vis-à-vis des écarts d'évaporation enregistrés au Piche (fig. 4). Ce résultat souligne le fait que dans les conditions de faible ventilation du phytotron, le pouvoir évaporant de l'air que

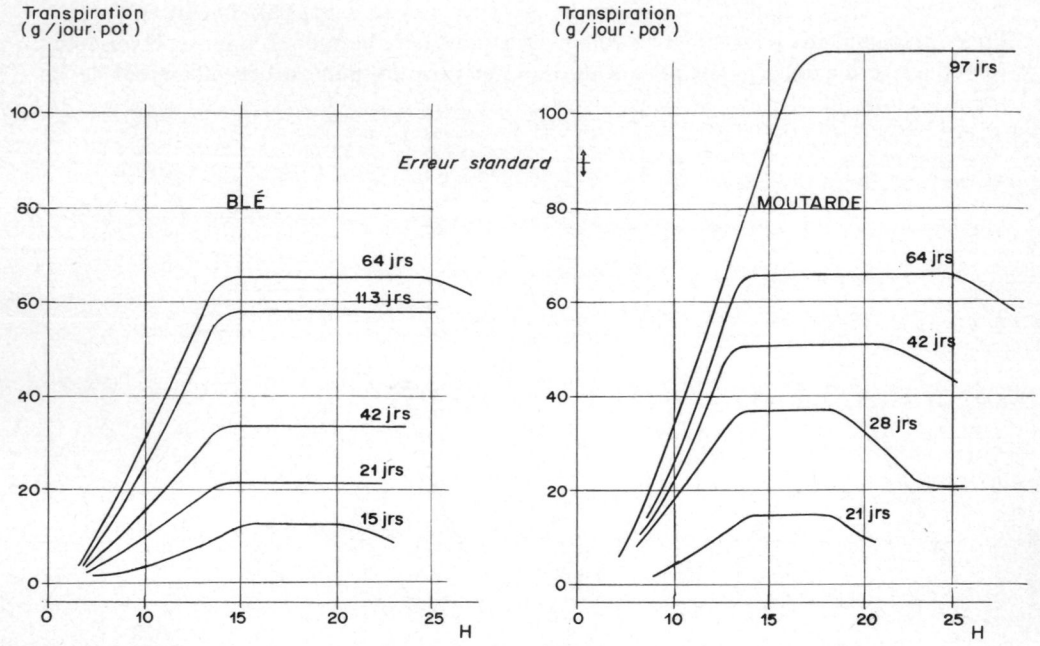


FIG. 5. — *Transpirations journalières du blé et de la moutarde à différents âges ; même sol* (limon) *et même condition d'évaporation* (5,4 mm.jour^{-1} au Piche).

Daily transpirations of wheat and mustard for different ages. Same soil (loam) *and same evaporative conditions* (5.4 mm.day^{-1} on Piche).

traduit en première approximation l'évaporimètre de Piche, ne contribue que pour une part négligeable à la transpiration de la feuille, l'essentiel étant sous le contrôle du rayonnement global.

3. — *Influence de l'âge de la plante sur le débit limite d'extraction*

Les expériences rapportées ici concernent le Blé et la Moutarde cultivés sur limon de la Minière, dans des conditions moyennes d'évaporation (conditions B du tableau 2) ; les résultats sont exprimés graphiquement sur la figure 5.

L'effet dépressif des fortes humidités se dissipe plus lentement (donc à des humidités plus faibles) sur les plantes jeunes que sur les plantes âgées ; il s'agit là, peut-être, d'un effet secondaire de la vitesse de dessèchement, accrue dans le cas des plantes âgées, et qui permet d'atteindre plus rapidement le niveau optimal d'aération des racines.

La phase finale d'utilisation de l'eau du sol (troisième branche des courbes), qui correspond à une carence hydrique plus ou moins prononcée et traduit l'évolution du débit limite d'extraction, marque une décroissance approximativement linéaire de ce débit d'extraction avec l'humidité du sol. La pente des droites représentatives de cette phase croît le plus souvent avec l'âge des plantes, et ces droites convergent pour un taux de transpiration nul vers une humidité du sol voisine du point de flétrissement permanent tel qu'on le détermine à pF 4,2.

La chute de transpiration (limite inférieure de H. F. U.) intervient à un niveau

pratiquement constant d'humidité du sol pour tous les traitements sauf deux : Blé de 15 jours et Moutarde de 97 jours, pour lesquels elle se produit plus tôt, c'est-à-dire à une humidité du sol plus élevée.

Pour le Blé de 15 jours, l'analyse de la distribution racinaire après le cycle de dessèchement a révélé que le fond des pots était encore peu exploité. Le dessèchement affectait essentiellement les couches supérieures du sol, et l'humidité moyenne calculée à partir de la pesée des pots surestime l'humidité présente effectivement dans la zone racinaire.

On remarquera, dans le cas de la Moutarde de 97 jours, que la phase carencée (troisième branche de la courbe) est pratiquement identique à celle de la Moutarde de 64 jours. Cela incite à penser qu'à ce stade de développement, l'accroissement de la masse racinaire active, s'il se poursuit, ne conduit pas à une augmentation du pouvoir d'extraction des racines. On mettrait ainsi en évidence une saturation des possibilités d'extraction des racines, dans le cas présentement étudié d'un système racinaire très dense et confiné dans une masse limitée de sol. Le Blé semble également présenter un pouvoir maximum d'extraction au stade 64 jours.

La gamme d'humidité facilement utilisable (H. F. U.) est donc assez stable dans les cas étudiés et ne semble pas affectée par le type d'enracinement.

III. — Interprétation et discussion

Les droites représentatives de la phase de carence expriment que le débit d'extraction de l'eau du sol ($g.jour^{-1}$) présente une valeur limite variant avec l'humidité H selon la fonction :

$$Q_{lim} = a(H - Hf) \tag{2}$$

ou encore, si l'on veut, que la vitesse de dessèchement du sol dH/dt ($jour^{-1}$) présente une limite reliée à H par

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_{lim} = \alpha(H - Hf) \tag{3}$$

avec $\alpha = 100\ a/M$, M étant la masse de terre sèche (g) présente dans les pots.

La pente α ($jour^{-1}$) varie avec la nature du sol, l'espèce végétale et le stade de développement considérés, les conditions dans lesquelles les plantes ont été cultivées, ... etc. La figure 6 montre les variations de ce coefficient α en fonction de l'âge des plantes et des diverses conditions de culture réalisées (A, B et C.) On retrouve sur ces figures certains faits déjà signalés :

— augmentation de α avec l'âge,
— tendance vers une limite, voire une décroissance de α au-delà d'un certain âge,
— valeur de α systématiquement plus élevée sur sable que sur limon,
— valeur de α plus élevée en conditions de culture à ETP faible.

On a proposé diverses formulations pour décrire l'extraction de l'eau par les racines. Parmi celles qui font appel à une analyse quelque peu physique des phénomènes, nous retiendrons une des plus simples (Bouchet et Hallaire, 1964) :

$$\xi = \beta \frac{D}{\lambda} (H - Hr) \tag{4}$$

dans laquelle on fait l'hypothèse, en s'appuyant essentiellement sur la loi de Darcy généralisée, que l'extraction ξ est

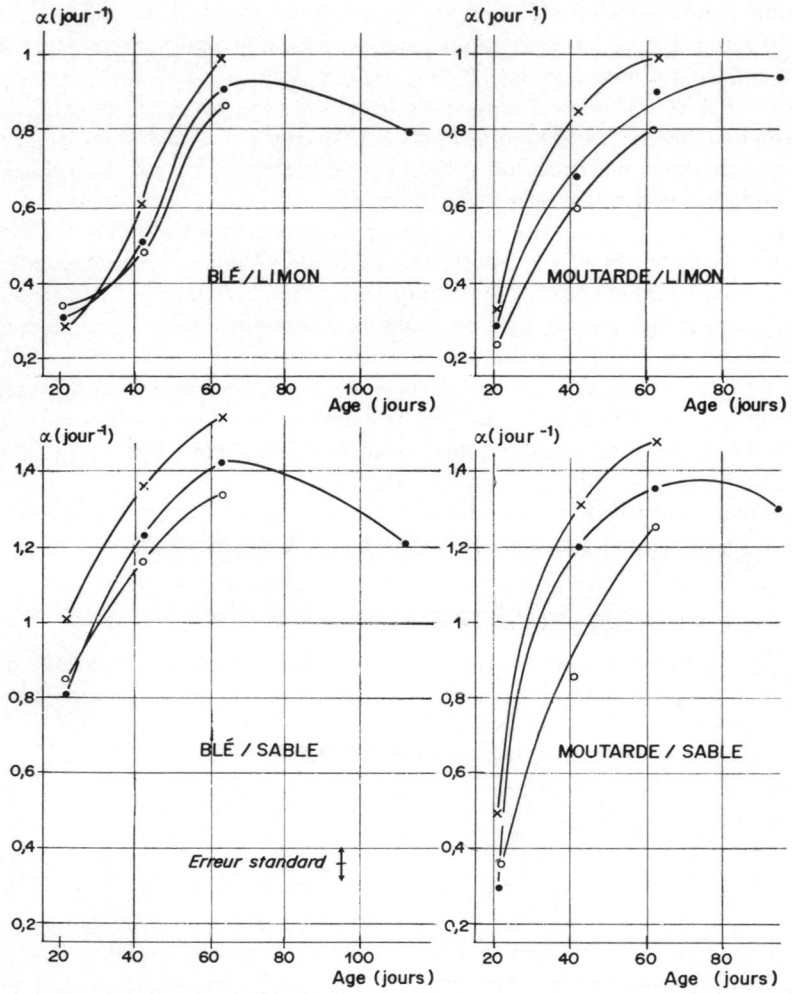


FIG. 6. — *Evolution de α en fonction de l'âge des cultures de blé et de moutarde, pour trois conditions d'évaporation* = 3,5(x), 5,4(•) *et* 7,5(○) *mm.jour*$^{-1}$ (mesurées au Piche).

Evolution of α as a function of time after planting wheat and mustard, under three evaporative conditions : 3.5(x), 5.4(•) *and* 7.5(○) *mm.day*$^{-1}$ (measured with Piche).

— directement proportionnelle
à la diffusivité hydraulique D du sol,
à la différence entre l'humidité moyenne H du sol et l'humidité Hr dans la proche rhizosphère ;

— inversement proportionnelle à une longueur λ qui est une évaluation pondérée de la distance moyenne que l'eau doit parcourir dans le sol avant de pénétrer dans les racines. Cette longueur ne peut être calculée précisément mais on admettra pour simplifier, qu'elle est égale au rapport du volume de sol prospecté à la surface totale des racines.

Le facteur de proportionnalité β intègre la géométrie du système racinaire.

Le rapprochement de l'expression (4) et de l'équation (3) déduite des expériences de dessèchement suggère que, pendant la phase carencée (phase III)

— d'une part l'humidité du sol Hr au contact des racines s'abaisse jusqu'à une valeur voisine du point de flétrissement permanent Hf. L'humidité de l'interface sol-racine est toujours plus faible que l'humidité moyenne du sol, sauf en cas d'exudations racinaires observées chez des plantes dont certains organes (feuilles ou partie de racines) sont maintenus dans des conditions d'humidité saturante (Vartanian, 1973). Ainsi pour la phase III de dessèchement de nos cultures, correspondant à des niveaux de pF supérieurs à 3, il est vraisemblable que l'humidité Hr est proche du point de flétrissement permanent ;

— d'autre part la quantité $\beta \frac{D}{\lambda}$ qui pourrait être identifiée au coefficient α de

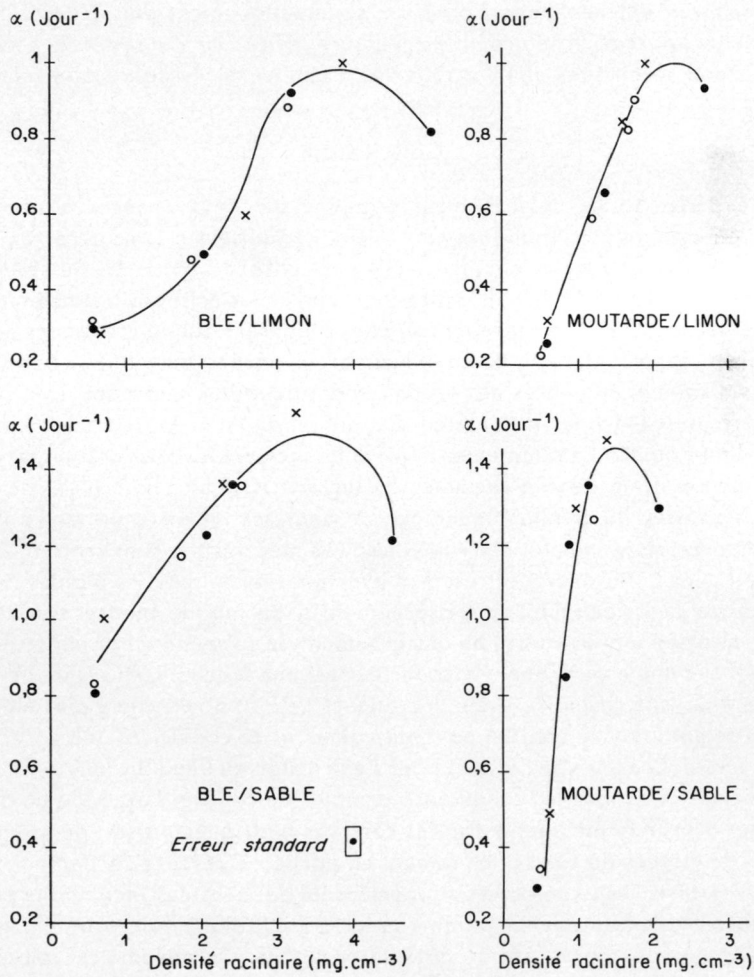


FIG. 7. — *Variation de α en fonction de la densité racinaire du blé et de la moutarde, pour trois conditions d'évaporation* : 3,5(x), 5,4(●) *et* 7,5(○) *mm.jour*$^{-1}$ (mesurées au Piche).

Variation of α as a function of the root density for three evaporation conditions : 3.5(x), 5.4(●) *and* 7.5(○) *mm.day*$^{-1}$ (measured with Piche).

l'équation (3) reste sensiblement constante, ce qui peut surprendre compte tenu des variations importantes que l'on admet généralement pour la diffusivité hydraulique D lorsque l'humidité du sol décroît. Remarquons toutefois que dans la gamme d'humidité considérée (capacité au champ-point de flétrissement permanent), de nombreux auteurs s'accordent à penser que la diffusivité varie peu (Valancogne, résultats non publiés sur limon de la Minière ; Hillel, 1974).

Sans vouloir considérer cette identification comme une démonstration, il est clair que l'augmentation de la pente a (soit encore du coefficient α) avec l'âge des plantes (fig. 6) doit refléter essentiellement une diminution de la longueur λ, liée à l'accroissement de la densité racinaire. La variation de α avec la densité racinaire est représentée sur la figure 7 pour l'ensemble des conditions de culture. Il n'y a pas de différence significative entre les trois conditions A, B, C, mais Blé et Moutarde se comportent très différemment. La valeur systématiquement plus élevée de α pour la Moutarde pourrait traduire une meilleure efficience du système racinaire de cette espèce et serait sans doute à relier à sa meilleure résistance à la sécheresse.

Conclusion

Les expériences de dessèchement réalisées sur deux espèces à enracinement différent, en conditions climatiques contrôlées, conduisent à considérer en première approximation la gamme d'humidité facilement utilisable H. F. U. du sol (intervalle d'humidité pour lequel ETR = ETM) comme une caractéristique relativement stable, variant seulement avec la texture du sol. Elles suggèrent que la croissance des plantes s'effectue en respectant certains équilibres entre parties aériennes et souterraines, équilibres d'ailleurs influencés par les conditions de milieu imposées. Une compensation s'opère ainsi entre les facteurs de diminution de H. F. U. (l'accroissement de la surface foliaire qui tend à augmenter ETM) et les facteurs favorisant son accroissement (l'augmentation de la densité racinaire qui accroît le débit limite d'extraction). Une étude plus poussée de ce phénomène devrait analyser les mécanismes de régulation de la croissance aérienne et souterraine, lesquels mécanismes sont vraisemblablement en relation avec l'utilisation des réserves hydriques du sol par les plantes.

L'analyse des cinétiques de dessèchement a permis de mettre en évidence un facteur α caractérisant la vitesse de dessèchement du sol pendant la phase de carence hydrique. Pour une espèce donnée, ce facteur est une fonction croissante de la densité racinaire. A densité racinaire égale, les valeurs de α sont nettement plus élevées pour la moutarde que pour le blé. On pourrait voir dans ce coefficient une caractérisation de l'efficience des racines de l'espèce pour l'extraction de l'eau du sol.

Il est certain que, dans les conditions normales de culture, l'aptitude physiologique des racines à tirer le meilleur parti des réserves hydriques du sol, de même que les propriétés physiques du sol, conditionnent en partie la réserve facilement utilisable, R. F. U. A ce titre, les expériences rapportées ici donnent des indications précieuses. On ne saurait toutefois omettre le fait que la R. F. U. dépend dans une large mesure de la profondeur explorée par le système racinaire. Ce paramètre volontairement écarté de la présente étude serait susceptible de conduire à une révision des classements des espèces en ce qui concerne leur aptitude à exploiter les réserves d'eau du sol.

Reçu pour publication en février 1980.

Remerciements

Nous remercions M. Hallaire (Station de Bioclimatologie, C.N.R.A. de Versailles) pour ses conseils et suggestions lors de la rédaction de cet article. Nous tenons également à adresser nos remerciements aux Professeurs Lemée (Laboratoire d'Ecologie Végétale, Université de Paris XI, Orsay) et Vernet (Laboratoire de Bioclimatologie et d'Ecologie Végétale, I.N.A., Paris-Grignon) pour avoir suivi ce travail avec intérêt.

Summary

Variations in readily available soil water range as a function of different ecological factors

Evolution of actual evapotranspiration ETR as a function of soil moisture content may be divided into a range of readily available soil moisture where ETR = ETM (part II, fig. 1) and a range of lower soil water content (part III, fig. 1) where ETR < ETM is limited by the threshold value of lowest accessible flow to roots.

The present study was undertaken to determine precisely the factors contributing to variations of these two phases. Two mesophytic species, Wheat and Mustard (*Triticum sativum* Lam. and *Sinapis alba* L.) were cultivated in controlled experimental conditions of Phytotron on two kinds of soils (loam and sand) differing by their moisture retention characteristics.

The variations observed in ETM (stationnary branches of fig. 4 and 5) can be related to leaf area evolution depending on the stage of growth of plants but also on the level of evaporative demand prior to the initiation of drying cycle (fig. 2 and 3). As for the linear relationships between ETR and water content [ETR = f(H)] in the range of lower soil water content, large variations can also be noticed in their slope (fig. 6). Those variations however may be related to differences in root density (fig. 7) which also depend on ageing and evaporative demand during the growth period.

In experiments related here variations in ETM and in the slope of the relationships ETR = f(H), were correlated so that the two ranges of humidity already defined remained nearly constant.

Zuzammenfassung

Schwankungen der leicht verwendbaren bodenwasserreserve in verbindung mit verschiedenen ökologischen faktoren

Die Kurve der Schwankungen der Evapotranspiration ETR in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit, führt zur Unterscheidung des leicht verwendbaren Feuchtigkeitsbereichs wo ETR = ETM (2. Teil der Kurve in Bild 1) und des geringeren Feuchtigkeitsbereichs (3. Teil, Bild 1) wo ETR, kleiner als ETM, auf den, den Wurzeln zugänglichen Grenzwasserfluss « Q_{lim} » beschränkt ist.

Die vorliegende Untersuchung vezweckt, die Schwankungsfaktoren dieser beiden Bereiche genau zu bestimmen. Diese Untersuchung wurde auf zwei Stammknospenarten (weizen und Senf) ausgeführt, die in Töpfen auf zwei Bodenarten (Lehm und Sand, Tabelle 1) in kontrollierten Räumen und verschiedenen klimatischen Bedingungen ausgesetzt (Tabelle 2), angepflanzt wurden.

Die festgestellten Schwankungen von ETM (Kurvenstufen der Bilder 4 und 5) sind grösstenteils durch die Unterschiede der Blattflächen bedingt, welche vom Alter der Pflanze abhängig sind, jedoch auch von der Verdunstungsfähigkeit der Luft während der vorhergehenden Wachstumsperiode (Bild 2 und 3). Betreffs der Geraden « $Q_{lim}(H)$ » an welche man den Teil der Kurve ETR = f(H) im geringeren Feuchtigkeitsbereich, anschliessen kann (Bild 4 und 5), zeigt ihre Neigung auch ziemlich grosse Schwankungen (Bild 6), welche aber mit den Schwankungen der Wurzeldichte in Verbindung stehen (Bild 7) die vom Alter sowie von den während der Wachstumsperiode auferlegten Verdunstungsbedingungen abhängen (Bild 2 und 3).

Im Rahmen der hier dargelegten Experimente, standen die Schwankungen von ETM und α [Neigung der typischen Gerade der Grenzgeschwindigkeit der Bodenaustrocknung $dH/dt_{lim} = f(H)$] derartig in Wechselbeziehung, sodass die beiden hier oben definierten Feuchtigkeitsbereiche annähernd Konstant blieben.

РЕЭЮМЕ

зависимость изменений запаса почвенной легкоупотребляемой влаги от разных экологических факторов.

АО Н. ДОДЕ Ф. А., ВАРТАНЯН Н.

Кривая изменений звапотранспирации ETR в зависимости от почвенной влаги позволяет различить градиент легкоупотребляемой влаги, где ETR = ETM/часть II кривой, фиг. 1), и градиент более слабой влаги (часть III, фиг. 1), где ETR < ETM сводится к предельному потоку воды Q_{lim}, доступной корням.

Целью нашей работы-уточнить факторы, влияющие на эти разные градиенты влаги. Предметом опытов служили пшеница и горчица, возделываемые в горшках на илу и песке (табл. 1), в климатической камере и при разных условиях (табл. 2).

Изменения ETM (ровная часть кривых, фиг. 4 и 5) зависят главным образом от разниц листовой поверхности, которые, в свою очередь, зависят от возраста растений и от способности воздуха к испарению во время предварительного роста (фиг. 2 и 3). Наклон кривых Q_{lim} [H] и части кривой ETR = f(H) в нижней области влаги (фиг. 4 и 5) показывает относительно большие изменения (фиг. 6), связанные с изменениями корневой плотности (фиг. 7). Эти изменения зависят от возраста и условий испарения во время роста (фиг. 2 и 3).

В рамках наших опытов, изменения ETM и α (наклон кривой предельной скорости почвенного усыхания $\frac{dH}{dt_{lim.}} = f(H)$) находились в прямой корреляции друг к другу и оба градиента влаги оставались постоянными.

Références bibliographiques

AHO N., 1976. *Contribution à l'étude expérimentale de l'évolution de la réserve facilement utilisable d'eau du sol en relation avec différents facteurs écologiques*. Thèse 3e cycle, Université Paris-Sud, Orsay, 52 p.

AHO N., DAUDET F. A., VARTANIAN N., 1977. Régime transitoire de transpiration au cours de l'installation progressive d'une carence hydrique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **285,** 159-162.

BOUCHET R. J. et HALLAIRE M., 1967. La réserve hydrique du sol facilement utilisable : ses variations et sa signification. In : *Colloque Franco-Polonais de l'Aménagement et de l'Economie de l'Eau*, Varsovie (Pologne), 21-23 sept. 1964, 287-294, Inst. Aménag. Econ. Eau, Ed.

DENMEAD O. T. et SHAW R. H., 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.*, **54,** 385-390.

HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol. Vég.*, **2,** 119-130.

HILLEL D., 1974. L'eau et le sol, Vander-Editeur, Louvain, 288 p.

JANJATOVIC V., 1968. Number and lenght of primary roots in different wheat genotypes. *Contempor. Agr.*, **16,** 13-20.

KOZLOWSKI T. T., 1949. Light and water in relation to growth and competition of Piedmont forest trees. *Ecol. Monogr.*, **19,** 207-231.

LEMEE G., 1953. Influence de la culture en sol sec ou en voie d'assèchement sur la physiologie de l'eau de *Lepidium sativum*. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **236,** 2260-2262.

MAERTENS C., BLANCHET R. et PUECH J., 1974. Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. *Ann. agron.*, **25,** 575-586.

MORIZET J., MILLET R., 1971. Etude de la mobilité de l'eau non saturante dans des colonnes de sols soumises à l'évaporation : influence de la texture et de la matière organique. *Ann. agron.*, **22,** 197-217.

PUECH J., 1969. Capacité de cession de l'eau des sols et essai d'interprétation des débits. *Ann. agron.*, **20,** 505-516.

PARCEVAUX S. de, 1964. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. In : *L'eau et la production végétale*, I.N.R.A., Paris, 63-150.

SCOTT-RUSSEL R. et SANDERSON J., 1967. Nutrient uptake of different parts of the intact roots of plants. *J. Expl. Bot.*, **18,** 491-508.

VARTANIAN N., 1967. Influence des facteurs hydriques du milieu sur la croissance racinaire. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **265,** 216-219.

VARTANIAN N., 1973. Particularités adaptatives de la Moutarde blanche, *Sinapis alba* L., à la sècheresse. In : *Réponse des plantes aux facteurs climatiques*. Actes Coll. Uppsala 1970, UNESCO, Paris, 277-288.

Ann. agron., 1980, **31** (2), 125-162.

Mise au point bibliographique
Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants
II. — Les facteurs de l'adsorption

R. CALVET *, Martine TERCÉ * et J.-C. ARVIEU **

* *Station de Science du Sol,*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*
** *Station de Science du Sol,*
Centre de Recherches d'Antibes, I.N.R.A.,
06602 *Antibes*

Résumé

Les effets des différents facteurs suivants sont décrits et analysés : les propriétés des molécules pesticides, les propriétés des matériaux adsorbants du sol, la température, les caractéristiques de la phase liquide au contact de l'adsorbant.

La structure électronique de la molécule intervient par la présence de charges (molécules ionisées), la polarité et la polarisabilité. Elle conditionne directement la nature des liaisons qui s'établissent avec la surface. L'aptitude à l'ionisation est déterminante de ce point de vue. Le volume moléculaire semble jouer un rôle d'après certains résultats publiés. La solvatation des molécules par l'eau et les solvants organiques est très importante à considérer. Il n'existe pas de relation générale entre l'adsorption et la solubilité dans l'eau, mais l'affinité des produits pesticides pour les solvants organiques peut parfois donner des informations intéressantes.

Les minéraux adsorbants du sol sont les argiles, les oxydes et les hydroxydes. Les propriétés d'adsorption des argiles sont très variables selon leur origine minéralogique et la nature des cations compensateurs. Ceux-ci peuvent d'ailleurs jouer le rôle de sites d'adsorption. Les hydroxydes libres ou associés peuvent être à l'origine d'une adsorption importante et expliquer les effets possibles de l'altération des minéraux. Les matériaux organiques présentent en général une capacité d'adsorption élevée qui peut toutefois varier au cours de l'humification. La nature des cations minéraux saturant les produits humiques joue également un rôle déterminant. Les associations minérales et organo-minérales présentent des propriétés d'adsorption parfois élevées mais elle ont été peu étudiées.

La température de mesure a une influence très variable sur l'adsorption selon la nature des matériaux adsorbants et des molécules. La composition de la solution au contact de l'adsorbant joue aussi un rôle important. L'acidité détermine l'ionisation des molécules et la présence de sels minéraux modifie parfois les quantités adsorbées sans que des explications simples puissent toujours être avancées. Enfin, la teneur en eau du système pesticide-adsorbant peut intervenir soit en conditionnant l'accessibilité des surfaces, soit en modifiant leurs propriétés physicochimiques. C'est un des points les moins bien étudiés.

I. — Propriétés des molécules pesticides

A. — *Généralités*

En déterminant partiellement la nature des liaisons entre les molécules adsorbées et l'adsorbant, les propriétés moléculaires jouent un rôle important dans les phénomènes d'adsorption. Ce rôle a été décrit avec plus ou moins de détails dans plusieurs

travaux bibliographiques (Greenland, 1965 ; Bailey et White, 1970 ; Mortland, 1970 ; Goring et Hamaker, 1972). L'examen des résultats publiés montre cependant qu'il est inutile de tenir compte de toutes les propriétés ; seules, quatre d'entre elles sont déterminantes :

— la structure électronique de la molécule,
— l'aptitude à être ionisée,
— le volume moléculaire,
— la solvatation des molécules par l'eau et les solvants organiques.

B. — *La structure électronique*

Les molécules pesticides appartiennent à l'une des deux catégories suivantes :

— molécules à structure ionique (molécules entièrement dissociées sous forme d'ions) ; ex. : sels de bipyridilium (paraquat, diquat...),

— molécules à structure covalente polaire (triazines, urées...) et non polaires (DDT, HCH)...).

1. *Molécules à structure ionique.*

Les sels minéraux d'ammonium quaternaire représentent une importante famille d'herbicides dont la partie organique se trouve sous forme de cations. La relation entre la distribution des charges positives et l'adsorption a été analysée par plusieurs auteurs dans le cas du diquat et du paraquat (Philen *et al.*, 1970 ; Burdon *et al.*, 1975 ; Hayes *et al.*, 1975). La distribution des charges proposée par ces derniers auteurs est représentée sur la figure 1.

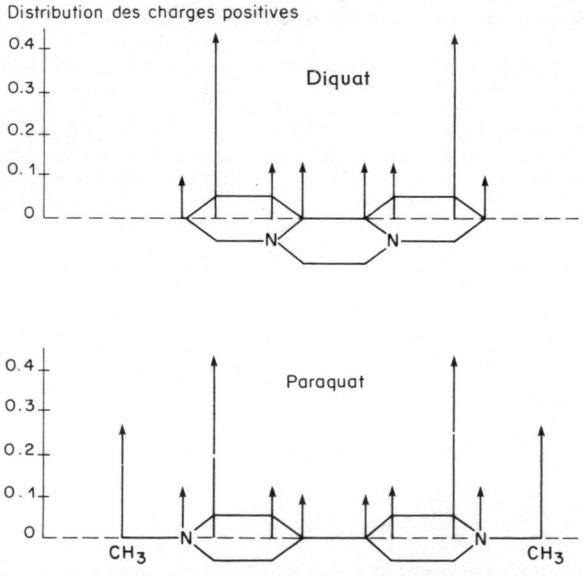


FIG. 1. — *Distribution des charges positives dans les molécules de diquat et de paraquat* (Hayes *et al.*, 1975).
Positive charge distribution in diquat and paraquat molecules.

Il en résulte que l'adsorption de ces molécules ne peut pas seulement se décrire par un échange ionique mais aussi par des interactions multipolaires avec la surface de l'adsorbant.

2. *Molécules à structure covalente.*

La répartition et la mobilité des charges sont des propriétés importantes chiffrées par les valeurs de la polarité et de la polarisabilité des molécules. Les liaisons de coordination, les liaisons cation-dipole, les liaisons hydrogène et les liaisons π en dépendent étroitement.

Un grand nombre de molécules pesticides sont polaires, mais peu de valeurs de moment dipolaire sont connues ; le tableau 1 en donne quelques exemples.

TABLEAU 1

Moments dipolaires de quelques triazines (Jordan, 1970)
Dipole moments of some triazine molecules

Pesticide	Atrazine	Amétryne	Propazine	Prométryne	Prométone
Moment dipolaire (μ) $\times$ 10^{18} ues.....	4,63	3,15	4,52	3,54	2,94

Les molécules citées dans ce tableau sont plus polaires que les molécules d'eau ($\mu = 1{,}85.10^{-18}$ ues). On pourrait donc s'attendre à une adsorption préférentielle de ces herbicides par rapport à l'eau. En fait, il n'en est rien car les solutions étant très peu concentrées, le nombre de chocs entre les molécules de soluté et la surface de l'adsorbant est petit. Il en résulte alors une très faible adsorption (voir le paragraphe traitant de la cinétique d'adsorption).

La polarité de la molécule dépend évidemment de sa structure. Les atomes et les groupements donneur d'électrons (Cl, $\rangle$N—, —CH_3...) ou accepteurs ($\rangle$C=0, $\rangle$S=0, phosphates, noyaux aromatiques, ...), déterminent en grande partie la valeur du moment dipolaire, donc l'importance de l'adsorption.

L'influence sur l'adsorption de la nature des substituants de l'atome d'azote des urées est mise en évidence par les résultats de plusieurs travaux (Hilton et Yuen, 1963 ; Hance, 1965 ; Weber, 1972).

Des règles générales sont cependant difficiles à énoncer et le comportement des molécules ne peut faire l'objet d'un classement que dans certains cas. La figure 2 donne un exemple de relation entre l'adsorption et le pouvoir donneur d'électrons des substituants de l'azote.

L'existence de formes mésomères (fig. 3) peut aussi être un facteur important et jouer un rôle dans les interactions entre les molécules organiques et les surfaces comme cela a été avancé pour l'adsorption du linuron sur des montmorillonites (Khan, 1974).

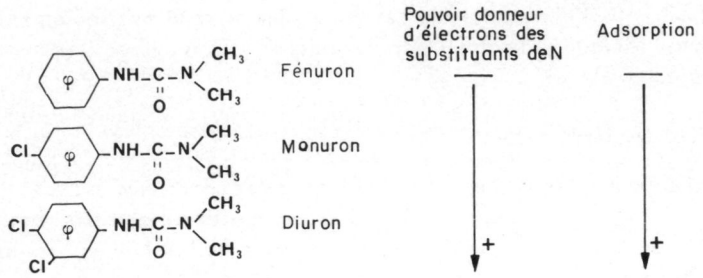
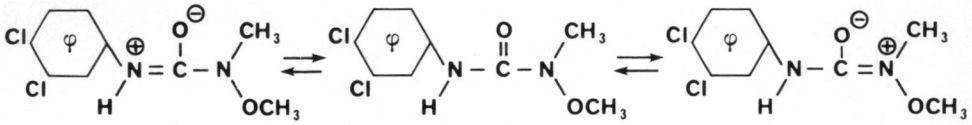


FIG. 2. — *Exemple de relation entre le pouvoir donneur d'électrons des substituants de l'atome d'azote et l'adsorption.*

Examples of relation between the electron donating power of the N substituents and the adsorption.



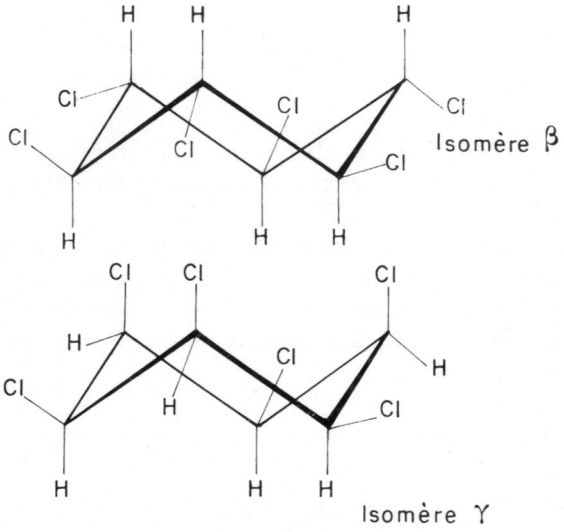


FIG. 3. — *Mésomérie de la molécule de linuron et stéréoisomérie de la molécule de HCH.*

Mesomery of the molecule of linuron and stereoisomery of the molecule of HCH.

Par ailleurs, deux stéréoisomères peuvent aussi présenter des aptitudes différentes à l'adsorption. Ainsi, l'isomère γ du HCH a un comportement différent de l'isomère β à cause probablement de sa polarité plus grande (Mills et Biggar, 1969) (fig. 3).

La présence de systèmes conjugués dans la molécule, notamment de noyaux aromatiques, peut également être une propriété intéressante en raison des liaisons π qu'ils peuvent former avec les ions métalliques.

Signalons par ailleurs que la structure électronique des molécules est parfois caractérisée globalement par des grandeurs telles que la fonction de Hammet et la fonction de Taft (Hamaker et Thomson, 1972). Des relations entre les valeurs de cette fonction et l'adsorption ont été recherchées dans le but d'obtenir un moyen de prévision du comportement des molécules pesticides. C'est ainsi que Briggs (1969) a montré l'existence d'une certaine relation entre les valeurs des fonctions de Hammet et de Taft et les quantités adsorbées de plusieurs urées et carbamates.

C. — *Ionisation des molécules*

Rappelons que certaines molécules sont complètement dissociées. Ce sont :

— les anions organiques à caractère acide fort (sulfonate d'alcoyle),

— les cations organiques à caractère de base forte (ammonium quaternaire).

Un assez grand nombre de pesticides sont par contre caractérisés par des propriétés d'acide ou de base faibles :

acide faible $\quad RCOOH \rightleftarrows RCOO^- + H^+ \quad Ka = \dfrac{[RCOO^-]\,[H^+]}{[RCOOH]}$

base faible $\quad R + H^+ \rightleftarrows RH^+ \quad Ka = \dfrac{[R]\,[H^+]}{[RH^+]}$

Le tableau 2 donne quelques exemples de valeurs de log $1/K_a = pK_a$ pour les principales familles de produits herbicides.

TABLEAU 2

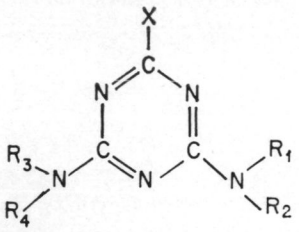
Exemples de valeurs du pK_a
Examples of pK_a values

Classe	Famille	Nom	pK_a
Bases très faibles	Urée	Diuron	— 2 à — 1
Bases faibles	S-triazines	Atrazine	1,68
		Terbutryne	4,30
		Atratone	4,20
	Triazole	Aminotriazole	4,17
Acides faibles	Acide picolinique	Piclorame	3,5
	Acides phényl alcanoïque	2,4-D	2,64-3,31
		2,4,5-T	3,14

En milieu acide, les bases faibles prédominent sous la forme protonée, tandis que les acides faibles sont sous forme non dissociée. Par contre, dans la zone de pH fréquemment rencontrée dans les sols agricoles (4 — 8, 5), les molécules pesticides à caractère acide faible sont sous la forme anionique et les molécules à caractère de base

faible peuvent être partiellement ionisées, sauf toutefois les urées dont le pK_a est trop faible.

La valeur de la constante d'ionisation dépend de la structure de la molécule. La figure 4 donne quelques exemples dans le cas des s-triazines.



— Influence du substituant X (Weber, 1967)

Electronégativité de X ↗ pK_a ↘

$X = Cl$ (atrazine) ($pK_a = 1{,}68$) $X = OCH_3$ (atratone) ($pK_a = 4{,}2$)

— Influence des substituants carbonés R_1 (Weber, 1969)

Pouvoir donneur d'électron ↗ pK_a ↗

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = C_2H_5$ (tétraétatone) ; $pK_a = 4{,}76$

$R_1 = R_3 = R_4 = C_2H_5$ (simetone)
$R_2 = H$; $pK_a = 4{,}15$

FIG. 4. — *Relations entre l'adsorption des triazines et la nature des substituants.*

Relations between the adsorption of triazines and the nature of substituents.

L'ionisation des molécules joue un rôle important dans l'adsorption des pesticides comme nous le verrons dans le paragraphe III. Ceci est dû au fait qu'elles permettent l'établissement de liaisons à énergie élevée, les liaisons ioniques.

D. — *Volume moléculaire*

Plusieurs travaux concernent l'influence de la taille des molécules sur l'adsorption. Ils font apparaître une relation entre la constante d'équilibre K_e et le parachor P_a (Lambert, 1967). Ce paramètre est défini de la façon suivante :

$$P_a = \gamma^{1/4} V$$

où γ est la tension superficielle et V le volume moléculaire. La figure 5 donne un exemple de ce genre de relation. Celle-ci n'est d'ailleurs valable que pour les molécules non ionisées. Par ailleurs, Hance (1969) a proposé de tenir compte de l'influence des liaisons hydrogène en modifiant la relation $K_e = f(P_a)$ de la façon suivante :

$$\log K_e = 0{,}00167\ (P_a - 45\ N) - 0{,}065$$

où N est le nombre de fonctions de la molécule capables d'établir des liaisons hydrogène.

La valeur de ces développements est en fait difficile à apprécier car peu d'applications en ont été faites.

E. — *La solvatation des molécules*

L'adsorption des pesticides dans les sols se fait le plus souvent à partir de solutions aqueuses quel que soit leur état physique dans les conditions de leur utilisation. Les pesticides gazeux sont en effet peu nombreux et dans un sol, les surfaces solides sont toujours recouvertes par des films d'eau, même dans des milieux non saturés en eau. Les interactions entre les molécules organiques et l'eau doivent donc jouer un rôle

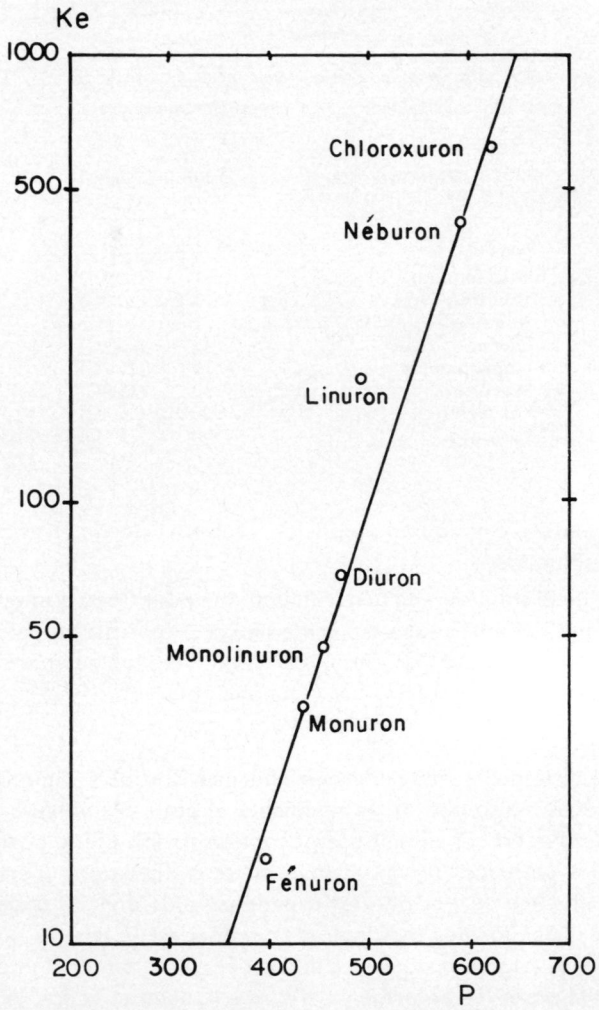


FIG. 5. — *Variation de la constante d'équilibre Ke en fonction du parachor Pa pour des phényl-urées substituées* (Lambert, 1967).

Plot of the adsorption constant Ke vs. parachor for substituted phenylurea herbicides.

tout à fait déterminant. La solubilité et la chaleur de dissolution sont des paramètres permettant de caractériser la solvatation d'un composé. Par ailleurs, les solvants non aqueux sont parfois utilisés pour étudier la nature des liaisons soluté-adsorbant. Ils présentent donc un intérêt d'ordre méthodologique que nous examinerons également.

1. *Solvatation par les molécules d'eau.*

a) *Dissolution dans l'eau.*

Compte tenu de leur très grande diversité chimique, les pesticides ont des solubilités très variables allant de la quasi insolubilité à la miscibilité totale. Quelques exemples sont donnés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Solubilité dans l'eau de quelques molécules pesticides
Aqueous solubility of some pesticide molecules

Pesticide	Solubilité : mg/l	
DDT	0,001	
Nitrofène	1	
Simazine	5,7	(20 °C)
Atrazine	29	(20 °C)
Diuron	42	(25 °C)
Napropamide	70	(25 °C)
Monuron	230	(25 °C)
Fénuron	2 900	(25 °C)
Dicamba	7 900	(25 °C)

A côté de la nature chimique du pesticide, plusieurs paramètres ont une influence marquée sur la solubilité :

— L'acidité de la solution : en général, l'affinité pour l'eau d'une molécule ionisée est plus grande que l'affinité d'une molécule neutre. Il en résulte que la solubilité des bases faibles augmente quand l'acidité s'accroît. La relation suivante est utilisée pour décrire cet effet dans le cas des triazines (Yamane et Green, 1972) :

$$S = Si\ [1 + 10^{(pKa - pH)}]$$

où Si est la solubilité de la molécule non chargée. En toute rigueur, cette formule n'est pas valable au voisinage de la neutralité et pour des valeurs extrêmes du pH (< 1 et > 12). Ceci n'est cependant pas gênant en raison d'une part, des valeurs du pK_a des molécules pesticides (toujours inférieures à 7), d'autre part des valeurs du pH des sols. L'influence de l'acidité est cependant plus difficile à décrire quand les molécules donnent des formes mésomères comme c'est le cas du piclorame notamment (Cheung, 1973). Signalons que l'acidité est également à l'origine de l'augmentation de la solubilité observée en présence d'argile (Calvet et Tercé, 1975).

— La composition saline de la solution : la solubilité des molécules neutres (urées) ou à caractère faiblement basique (triazines) diminue quand la concentration saline augmente (Van Bladel, 1971 ; Hurle et Freed, 1972 ; Gaynor, 1973). Cet effet entre en compétition avec la formation de sels qui accroît la solubilité pour les molécules à caractère acide faible comme le piclorame (Cheung, 1973).

— La température : la solubilité augmente en général avec la température à l'exception de certains carbamates (Freed, 1966). Les valeurs connues des enthalpies de dissolution sont faibles ; quelques exemples en sont donnés dans le tableau 4.

La solubilité dans l'eau des pesticides gazeux est rarement négligeable. Les quelques études concernant ce phénomène montrent qu'il est en général régi par la loi de Henry, la concentration en solution à l'équilibre dépendant de la quantité de produit apportée, de la quantité d'eau présente et du volume disponible pour le gaz (Leistra, 1970 ; Smelt et Leistra, 1974 ; Arvieu, 1979). Il en résulte donc que toute indication de solubilité concernant ces pesticides n'a de sens que si elle est accompagnée

TABLEAU 4

Enthalpie de dissolution de quelques molécules pesticides
Anthalpy of dissolution of some pesticide molécules

Herbicide	Enthalpie de dissolution kcal mole^{-1}	Auteurs
Fénuron	3,6	Van Bladel, 1971
Monuron	5,2	— —
Piclorame	3,1 ± 0,2	Cheung, 1973
Simazine	5,9 ± 0,5	Calvet *et al.*, 1975
Atrazine	5,4 ± 0,2	— —
TBA.....	1,6	Freed, 1966
Amiben.....	2,8	— —
Dicamba	1,9	— —
2,4-D.....	6,1	— —
EPTC	— 3,9	— —
Diclobenyl	2,8	— —
Linuron	4,47	— —

de la valeur de la pression partielle du produit gazeux à l'équilibre. Le facteur température doit toujours être pris en considération car la solubilité diminue fortement quand la température croît. La vitesse de dissolution est fonction de l'aire de l'interface gaz-liquide ; dans l'état de dispersion de l'eau du sol, elle est probablement élevée.

b) *Dissolution dans l'eau et adsorption.*

Plusieurs auteurs ont essayé de relier les caractéristiques de l'adsorption des pesticides par les sols à leur solubilité dans l'eau. Les résultats obtenus sont contradictoires comme le montre le tableau 5.

TABLEAU 5

Relations observées entre l'augmentation de la solubilité et l'adsorption
0 : pas de relation ; — : l'adsorption diminue
Observed relations between the increase of solubility and the adsorption.
0 : no relationship ; — : adsorption decreases

Adsorbant	Relation entre l'augmentation de la solubilité et l'adsorption	Pesticide	Auteurs
Sols	0	urées substituées	Briggs, 1969
Sols	0	—	Hance, 1973
Montmorillonite	—	—	Bailey *et al.*, 1968
Sols	—	—	Hilton et Yuen, 1963
Sols	—	—	Grover, 1975
Charbon actif.....	—	dérivés chlorés de l'acide phénoxy-acétique	Léopold *et al.*, 1960
Montmorillonite	—	organo-phosphorés	Bowman et Sans, 1977
Tourbes, Bentonites...	—	HCH	Mills et Biggar, 1969

Pour les triazines, des contradictions existent également entre les résultats de Bailey *et al.* (1968), Talbert et Fletchall (1965) et ceux de Ward et Holly (1966).

Compte tenu de leur solubilité et des conditions d'humidité du sol au moment du traitement, l'adsorption des pesticides gazeux doit le plus souvent se produire à l'interface solution/adsorbant. Comme l'amplitude du phénomène est mesurée grâce aux variations de composition de la phase gazeuse, il est généralement difficile de discriminer les quantités dissoutes et adsorbées. Quand l'isotherme d'adsorption est linéaire, les coefficients de partage du produit entre les phases solide, liquide et gazeuse sont reliés par :

$$K\,(s/g) = K\,(s/l) \times K\,(l/g)\ .$$

Cette relation permet de calculer le coefficient de partage K (s/l) entre l'adsorbant et la solution si K (s/g) et K (l/g) ont pu être mesurés par ailleurs.

2. *Relation entre l'adsorption et le coefficient de partage entre l'eau et des solvants organiques.*

La comparaison entre les affinités des molécules pesticides pour l'eau et les solvants organiques peut permettre d'obtenir des informations sur les interactions soluté-adsorbant. Elle est généralement faite en mesurant le coefficient de partage des composés étudiés. A cet effet, Briggs (1969) a utilisé les valeurs de la fonction π de Hansch déterminées à partir du partage entre l'eau et l'octanol. Il a ainsi trouvé une relation

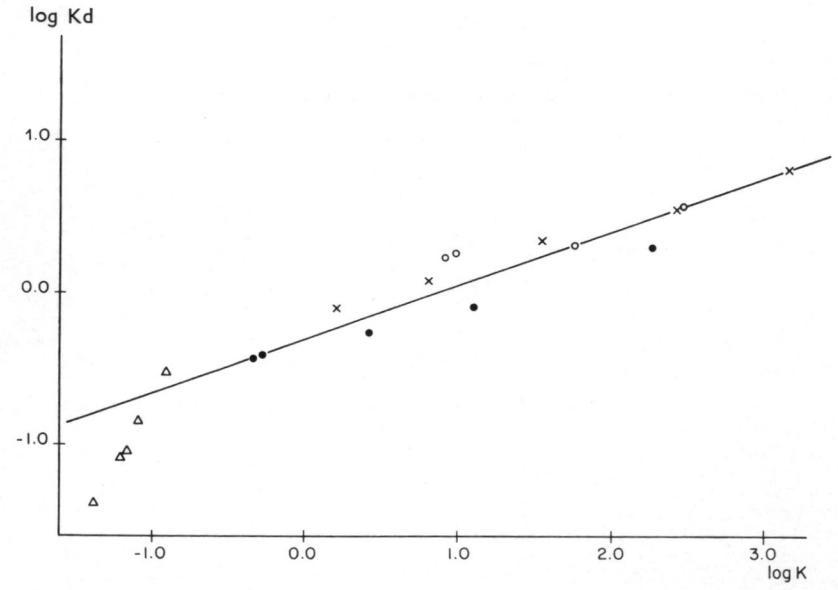


FIG. 6. — *Variation du logarithme de la constante d'adsorption Kd de diverses triazines en fonction du logarithme du coefficient de partage entre l'eau et le cyclo-hexane* (Ward et Holly, 1966). Hydroxy-triazine (△), oxyméthyl-triazine (•), chloro-triazine (×), méthylthio-triazine (○).

Plot of the logarithm of the adsorption constant Kd vs. *the logarithm of partition coefficient between water and cyclohexane.*

entre ces valeurs et les quantités adsorbées de plusieurs carbamates. Ward et Holly (1966) ont également observé une relation linéaire entre le logarithme du coefficient de distribution K_d et le logarithme du coefficient de partage de diverses triazines entre l'eau et l'hexane (fig. 6). La chromatographie de partage en couches minces peut aussi être utilisée pour obtenir des informations du même type (Hance, 1967).

II. — Propriétés des matériaux adsorbants du sol

Elles sont complémentaires des propriétés moléculaires et contribuent en partie à fixer la nature des liaisons entre les molécules pesticides et la surface de l'adsorbant. Nous ne parlerons pas des propriétés de matériaux parfois utilisés tels que le nylon, la cellulose, les gels de silice, mais nous examinerons plutôt celles des constituants du sol et de certaines de leurs associations. Il faut noter l'existence d'une ambiguïté permanente liée aux méthodes de séparation des constituants du sol. Ceux-ci peuvent en effet subir des transformations au cours de l'extraction. Il peut alors se faire que les propriétés d'adsorption observées avec ces adsorbants ne reflètent pas exactement celles qui interviennent réellement dans le sol. Malgré ces réserves, elles permettent d'apporter des informations sur les mécanismes et doivent être complétées par des études faites directement sur les sols. Ces dernières ne sont cependant pas à l'abri de toute critique : le prélèvement d'un sol et son stockage peuvent en effet entraîner d'éventuelles modifications des propriétés d'adsorption.

A. — *Les constituants minéraux*

1. *Les argiles.*

La structure et les propriétés des argiles sont décrites dans plusieurs ouvrages (Van Olphen, 1963 ; Grim, 1968 ; Caillère et Hénin, 1969). Les principales caractéristiques des argiles sont dues à leur propriété d'échange d'ions et à leur surface souvent très grande (ex. : $\simeq$ 800 m^2/g pour les montmorillonites).

a) *Influence de la nature minéralogique.*

Du fait de leur structure et de leur composition différente, on peut s'attendre à ce que les argiles diffèrent aussi par leurs propriétés d'adsorption. Le tableau 6 permet de comparer un certain nombre de résultats obtenus avec les trois argiles les plus étudiées : la montmorillonite, l'illite et la kaolinite. Il est tentant d'établir des classements tels que ceux qui sont indiqués, bien qu'ils ne soient pas d'une très grande utilité. Comme nous le verrons dans le prochain chapitre, il est en fait très difficile de comparer des résultats obtenus par différents auteurs. De plus, il faut parfois tenir compte de la structure cristalline pour faire des comparaisons entre des argiles appartenant au même groupe. Van Bladel et Moreale (1974), Vallet *et al.* (1973) ont par exemple montré qu'il y avait une importante différence entre les propriétés d'adsorption d'une montmorillonite du type Wyoming et une montmorillonite du type Camp Berteau. Ceci peut être attribué à la différence de localisation des défauts de réseau dans ces deux argiles.

TABLEAU 6

Caractéristiques de l'adsorption de plusieurs pesticides par trois argiles
(montmorillonite, kaolinite et illite)

Adsorption characteristics of several pesticides on three clays
(montmorillonite, kaolinite and illite)

Pesticide	Argile	Constantes de l'isotherme de Freundlich		Auteurs
		nf	Kf	
Atrazine	M-Ca ; pH = 2,8-3,0.....	0,78	65	Tercé et Calvet, 1978
M > I	I-Ca ; pH = 2,8-3,0.....	0,35	7,2	Tercé et Calvet, 1978
Terbutryne	M-Ca ; pH = 2,8-3,0.....	1,60	3 065,0	Tercé et Calvet, 1978
M > K > I	K-Ca ; pH = 2,8-3,0.....	1,60	447,0	Tercé et Calvet, 1978
	I-Ca ; pH = 2,8-3,0.....	1,20	199,0	Tercé et Calvet, 1978
Triallate	M-Na ; pH = 9,9	0,99	10,0	Grover, 1974
K > M	K-Na ; pH = 7,1	0,97	16	Grover, 1974
2,4-D	M (*).....	1,0	9	Haque *et al.*, 1968
I > M > K	K (*).....	1,0	0,43	Haque *et al.*, 1968
	I (*)	1,0	13,8	Haque *et al.*, 1968
Trifluraline	M-Na ; pH = 9,5.....	1	35	Grover, 1974
K > M	K-Na ; pH = 6,7.....	0,96	65	Grover, 1974

Les lettres M, K et I désignent respectivement les argiles suivantes : montmorillonite, kaolinite et illite. Les classements indiqués sous le nom des pesticides correspondent à l'ordre d'adsorption décroissante.
(*) Les auteurs n'ont pas précisé la nature des cations compensateurs.

b) *Rôle de la composition ionique de la surface.*

La nature des cations compensateurs de l'argile est très importante. Ils peuvent en effet intervenir de trois façons différentes : en étant en compétition avec les molécules pesticides pour les sites d'adsorption, en pouvant être à l'origine de sites d'adsorption et enfin en permettant la formation d'associations argiles-hydroxydes.

α) *Compétition.*

Cet effet est observé quand il y a formation de liaisons ioniques. Avec les cations bipyridilium il dépend de la nature de l'argile : peu marqué avec la montmorillonite, la kaolinite et l'illite, il est très net avec la vermiculite (Weber et Weed, 1968 ; Hayes *et al.*, 1975). Dans ce dernier cas, l'adsorption décroît dans l'ordre :

$$Na^+ > Li^+ > Sr^{2+} = Ca^{2+} \geqslant Ba^{2+} \geqslant Mg^{2+} > K^+ = NH_4^+$$

La position de K^+ et NH_4^+ est due à la grande affinité de la vermiculite pour ces cations.

Il existe également une compétition avec les bases faibles. C'est ainsi qu'en milieu acide, l'adsorption des triazines diminue dans l'ordre (Hance, 1969 ; Vallet *et al.*, 1973) :

$$Na^+ > Ca^{++} > Mg^{++}$$

β) *Les sites d'adsorption dus aux cations*

Le tableau 7 présente un certain nombre de résultats mettant en évidence l'effet de la nature des cations compensateurs. Celui-ci peut intervenir de deux manières :

- directement en permettant l'établissement de liaisons cation-dipole et de liaisons de coordination ;
- indirectement par les molécules d'eau d'hydratation. Sous l'effet du champ électrique dû aux cations et au réseau de l'argile, les molécules d'eau sont fortement polarisées et peuvent facilement se dissocier, constituant ainsi une source de protons (Mortland *et al.*, 1963 ; Calvet *et al.*, 1964). Il s'agit ici d'une propriété fréquemment appelée acidité de surface. Il en résulte que les molécules organiques peuvent être retenues sur la surface par des liaisons allant de la liaison hydrogène à la liaison ionique :

TABLEAU 7

Effet de la nature des cations compensateurs sur l'adsorption de plusieurs pesticides
Effect of the compensating cations on the adsorption of several pesticides

Pesticide	Classement par ordre d'adsorption décroissante	Liaison supposée	Auteurs
Linuron	$Fe^{3+} > Ce^{4+} > Cu^{2+} > Ni^{2+} > Ca^{2+}$	Liaison de coordination	Hance, 1971
Linuron	$Al^{3+} > Cu^{2+} > Ni^{2+} > Mg^{2+}$	Liaison de coordination	Khan, 1974*a*
Monuron Fénuron	$Al^{3+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^{+}$	Liaison hydrogène	Van Bladel et Moreale, 1974
Piclorame	$Cu^{2+} > Al^{3+} > Zn^{2+} > Fe^{3+}$	Liaison de coordination	Arnold, 1973
Atrazine	$Fe^{3+} > Al^{3+} > Ca^{2+}$	Liaison de coordination	Tercé et Calvet, 1977
Terbutryne	$Fe^{3+} > Al^{3+} > Ca^{2+}$	Liaison de coordination	Tercé et Calvet, 1977
Méthabenzthiazuron	$Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+}$	Liaison de coordination	Tercé et Calvet, 1977
Dasanit	$Fe^{3+} > Cu^{2+} > Pb^{2+} > H^{+} > Al^{3+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Li^{+} > Na^{+}$	Cation-dipole	Bowman, 1973
Malathion	$Fe^{3+} > Al^{3+} > Cu^{2+} > Ca^{2+} > Na^{+}$	Liaison hydrogène	Bowman *et al.*, 1970
Parathion Fenitrothion Méthylparathion Aminoparathion Paraoxon	$Fe^{3+} > Ca^{2+} > Na^{+}$	Cation-dipole	Bowman et Sans, 1977

Dans ces conditions, l'importance de l'adsorption doit dépendre de l'électronégativité du cation compensateur M^{n+}. Les observations de Saltzman et Yariv (1976) vont dans ce sens bien qu'une règle générale ne puisse pas en être déduite (tabl. 8).

TABLEAU 8

Exemple d'une possible relation entre l'adsorption et l'électronégativité des cations compensateurs (Saltzman et Yariv, 1976)

Examples of a possible relation between the adsorption and the electronegativity of the compensating cations

Cation compensateur	Na^+	Li^+	Mg^{++}	Al^{+++}	K^+	Ca^{++}
Electronégativité	0,9	1,0	1,2	1,5	0,8	1,0
Adsorption µg/l.....	36,5	96,5	243,2	325,8	89,7	313,0

Il faut également signaler que les ions NH_4^+ peuvent aussi être à l'origine d'une protonation comme cela a été montré avec l'aminotriazole (Russel *et al.*, 1968).

γ) *Formation d'associations argiles-hydroxydes.*

Les ions Al^{3+} et Fe^{3+} peuvent former des hydroxydes sur la surface des argiles. Leurs propriétés se trouvent alors considérablement modifiées comme l'indique le tableau 9.

TABLEAU 9

Adsorption de plusieurs herbicides par : 1) *des montmorillonites Al et Fe avec et sans traitement par NaOH* ; 2) *des hydroxydes d'aluminium et de fer* (Tercé et Calvet, 1977)

Adsorption of several herbicides by Al and Fe-montmorillonites with and without NaOH treatment and by aluminium and iron hydroxydes

	Montmorillonite-Al		Montmorillonite-Al + NaOH		Hydroxyde	
	Q_a	pH	Q_a	pH	Q_a	pH
Atrazine	0,37	6	2,70	7,4	0,50	6,2
Terbutryne	2,40	5,8	2,25	7,5	0,45	6,2
Méthabenzthiazuron ..	2,80	6,1	2,90	6,8	0,30	6,2
Diuron	0,08	6,0	0,43	7,3	0,20	6,2
Piclorame	0	5,3	1,40	7,3	0,20	6,2

Q_a en µmole/g.

	Montmorillonite-Fe		Montmorillonite-Fe + NaOH		Hydroxyde	
	Q_a	pH	Q_a	pH	Q_a	pH
Atrazine	0,94	4,6	1,50	5,7	0,32	7,5
Terbutryne	2,50	5	2,40	5,8	0,29	7,5
Methabenzthiazuron ..	2,05	5,0	2,10	5,9	0,25	7,5
Diuron	0,11	4,9	0,25	5,7	0,20	7,5
Piclorame	0,02	4,4	0,25	5,7	0,20	7,5

Q_a en µmole/g.

Ces observations jointes aux précédentes montrent que tout phénomène amenant de l'aluminium ou du fer sur la surface des argiles aura une très grande influence sur l'adsorption des pesticides. L'acidité du milieu apparaît alors d'une importance particulièrement grande puisqu'elle est à l'origine de l'hydrolyse du réseau cristallin des argiles dont le principal effet est la libération d'ions Al^{3+} et Fe^{3+}.

2. *Oxydes et hydroxydes.*

Il existe une très grande variété d'oxydes et d'hydroxydes dans le sol, depuis les composés bien cristallisés jusqu'aux composés amorphes.

a) *Oxydes et hydroxydes cristallisés.*

Les minéraux les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

- oxydes de silicium : quartz, cristoballite. Ils sont souvent associés aux argiles
- oxydes et hydroxydes de manganèse : toujours associés aux espèces amorphes,
- oxydes et hydroxydes d'aluminium : les plus répandus sont la gibbsite ($Al(OH)_3$), la boehmite (γ AlOOH) et le diaspore (α AlOOH),
- oxydes et hydroxydes de fer : hématite (α Fe_2O_3) et goethite (Fe_2O_3, H_2O).

La capacité d'adsorption de ces minéraux est peu importante dans le cas des bases faibles (Tercé et Calvet, 1975). Pour des acides faibles, par contre, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium peuvent présenter des propriétés d'adsorption non négligeables (Cheung, 1973).

b) *Oxydes et hydroxydes amorphes.*

Ce sont des matériaux assez peu connus. L'essentiel de leurs caractéristiques a été rassemblé par Wada et Harward (1974). Leur étude est toujours difficile car ils sont toujours associés à d'autres minéraux, ce qui rend leur séparation délicate. Le sens d'une telle opération est d'ailleurs douteux car il est à craindre qu'elle entraîne des modifications plus ou moins importantes.

Les hydroxydes d'aluminium sont fréquemment associés aux argiles et recouvrent les surfaces basales externes et interfoliaires. Ils proviennent de l'altération du réseau cristallin de l'argile en milieu acide. Ce fait montre que les argiles sont des minéraux instables qui n'existent jamais seuls dans les sols acides. Quant aux hydroxydes de fer, ils se trouvent surtout sous forme d'enrobages des particules d'argile.

Les hydroxydes d'aluminium et de fer jouent un rôle très important dans l'adsorption des pesticides (Tercé et Calvet, 1975, 1977).

Des travaux récents ont montré que les propriétés d'adsorption des argiles devaient provenir très souvent de la présence d'hydroxydes sur les surfaces. Ces composés peuvent posséder des charges positives dues à des groupements du type $Al(OH)^+$ et $Fe(OH)^+$. La capacité d'échange qui en résulte est de l'ordre de 2 à 6 meq/100 g (Bailey et White, 1970) et peut donc être à l'origine d'une adsorption d'anions. Enfin, étant donné le caractère très imparfait de ces hydroxydes, des groupes OH manquent et peuvent être remplacés par des ligands organiques.

Les hydroxydes libres présentent une grande capacité d'adsorption (Tercé et Calvet, 1975) en raison de leur aire de surface élevée (400-800 m^2/g) et de la présence de nombreux groupes OH, sites potentiels pour la formation de liaisons hydrogène.

3. *Allophanes.*

Ce sont des composés amorphes parfois fréquents dans les sols d'origine volcanique. Les allophanes sont des aluminosilicates hydratés de composition chimique variable et possèdent une aire de surface élevée ($\simeq$ 500 m^2/g). La présence de charges négatives ou positives leur confère des propriétés d'échangeurs d'ions. Ces minéraux n'ont pas fait l'objet d'étude particulière de l'adsorption des pesticides, en raison probablement de leur origine qui limite quelque peu leur intérêt.

B. — *Constituants organiques*

1. *Généralités.*

Les composés appartenant à la matière organique non vivante se classent en deux groupes : les composés humiques et les composés non humiques. Ces derniers sont essentiellement constitués par des résidus végétaux en voie de décomposition et comprenant des produits de poids moléculaire très variable mais de nature chimique bien définie tels que des protéines, des acides aminés, des lipides et des acides. Ces produits ont une brève existence dans le sol car ils sont facilement biodégradables.

Résultats de l'humification, les substances humiques sont des composés dont la structure et les propriétés sont encore très mal connues. Il est d'usage de les répartir en trois fractions basées sur des critères d'extraction en milieux acides ou alcalins. C'est ainsi que l'on distingue les acides fulviques, les acides humiques et l'humine (Kononova, 1961 ; Schnitzer et Khan, 1972). Ils possèdent tous les mêmes groupements fonctionnels (carboxyliques, phénoliques,... etc.) dont les exemples de répartition sont donnés dans le tableau 10.

TABLEAU 10

Répartition des principaux groupements fonctionnels rencontrés dans plusieurs composés organiques du sol (Schnitzer et Khan, 1972)

Repartition of the main functional groups found in several organic compounds of the soil

Oxygène (p. 100)	p. 100 d'oxygène se trouvant sous forme de groupements					Oxygène représenté (p. 100)
	carboxylique	phénolique	alcoolique	carbonyl	méthoxy	
			Acides humiques de sol			
32,9	43,8	10,2	13,6	21,4	1,5	90,5
36,8	26,1	24,9	15,2	7,8	— (a)	74,0
35,4	13,6	38,0	12,7	4,1	— (a)	68,4
35,6	42,2	24,7	0,9	23,4	— (a)	91,2
33,6	44,8	17,1	— (a)	14,8	1,4	78,1
			Acides fulviques de sol			
47,3	57,5	19,3	11,5	5,8	— (a)	94,1
44,8	65,0	11,8	12,9	11,1	1,7	102,5
47,7	61,0	9,1	16,4	3,7	1,0	91,2
			Humines de sol			
33,8	36,0	9,9	— (a)	22,7	1,9	70,5
31,8	26,1	12,1	— (a)	28,7	1,5	68,4

(a) Non déterminé.

Les acides fulviques ont des poids moléculaire généralement compris entre 3 000 et 20 000 et sont plus riches en fonctions oxygénées que les acides humiques. Ces derniers ont par contre des poids moléculaires élevés pouvant aller jusqu'à 300 000 environ. Les humines ne seraient pas de nature particulière mais représenteraient plutôt la fraction des substances humiques très fortement liée aux constituants minéraux. Certains schémas structuraux ont été proposés ; la figure 7 en donne des exemples tirés de l'ouvrage de Schnitzer et Khan (1972).

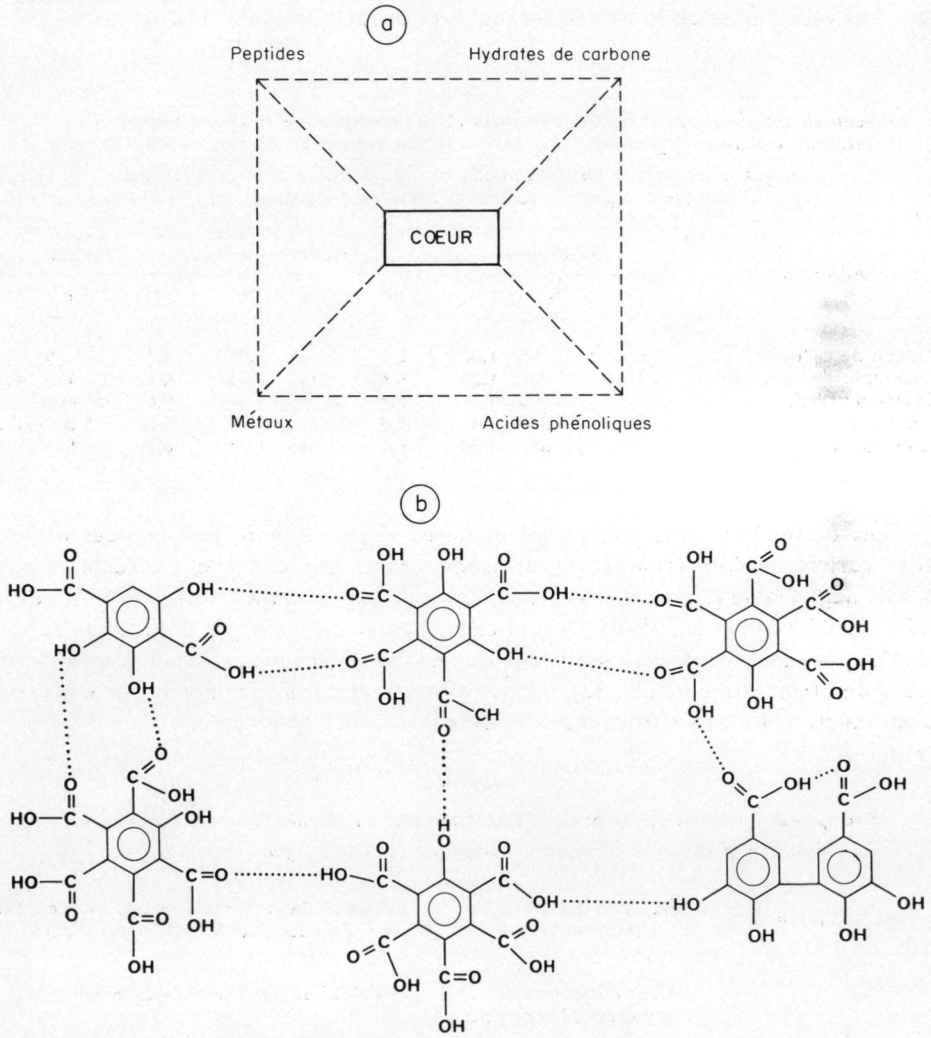


FIG. 7. — a) *Représentation schématique de la structure des acides humiques.*
b) *Structure proposée pour les acides fulviques* (Schnitzer et Khan, 1972).
a) *Schematic representation of humic acid structure.* b) *Proposed structure for fulvic acids.*

Les composés humiques possèdent des caractères de substances colloïdales. Ils peuvent former des suspensions et développer des aires de surface importantes (500 à 800 m^2/g). Les groupements fonctionnels acides leur confèrent par ailleurs des pro-

priétés d'échange de cations avec une capacité d'échange pouvant varier entre 200 et 400 meq/100 g.

2. *Constitution des matières organiques et adsorption des pesticides.*

La matière organique des sols est encore trop mal connue pour qu'il soit possible de décrire des relations précises entre sa structure, sa composition chimique et ses propriétés d'adsorption. Comme le montrent un certain nombre de travaux, celles-ci sont très variables selon la nature des matières organiques (tabl. 11).

TABLEAU 11

Valeurs des constantes de l'isotherme de Freundlich pour l'adsorption de trois herbicides par plusieurs matériaux organiques (Grover, 1974). *Les valeurs de K_f sont données en* µg/g

Values of constants of Freundlich isotherms for adsorption of three herbicides on several organic materials. Values of K_f are given in µg/g

Adsorbant	Trifluraline			Triallate			Diallate		
	pH	K_f	n_f	pH	K_f	n_f	pH	K_f	n_f
Poudre de cellulose.....	6,2	56	1,00	6,1	21	0,96	6,3	38	0,80
Triacétate de cellulose..	4,2	1 000	1,38	4,4	190	1,06	4,6	195	0,73
Charbon activé.....	9,5	115 000	1,51	9,4	65 000	1,45	9,6	350 000	1,58
Tourbe	3,6	13 500	1,41	3,8	710	0,94	4,0	1 080	0,67
Paille de blé.....	5,8	830	1,04	6,0	365	1,04	6,2	530	0,68

Les acides humiques comme les matières végétales non décomposées ont des rôles variables selon les molécules envisagées mais leur capacité d'adsorption n'est jamais négligeable (Doherty et Warren, 1969 ; Dunigan et Mc Intosh, 1971 ; Grover, 1974 ; Gaillardon *et al.*, 1978). Devant cette situation, deux types de travaux se sont développés : les uns concernent l'étude de l'évolution des propriétés d'adsorption au cours de l'humification (tabl. 12), les autres essaient de déterminer les groupements fonctionnels actifs ou les fractions actives de la matière organique.

TABLEAU 12

Exemples de variations des propriétés d'adsorption dues à l'évolution des matières organiques

Examples of variations of adsorption properties due to the organic matter evolution

Stade d'évolution	Evolution d'une tourbe (Morita, 1976)		Evolution de matières végétales incorporées à un sol (Gaillardon *et al.*, 1978)			
	Valeur des constantes de l'isotherme de Freundlich		Valeur du coefficient de distribution K_d			
			Paille de blé		Luzerne	
	Linuron		Diuron	Terbutryne	Diuron	Terbutryne
Stade initial.....	$K_f = 24$;	$n_f = 0{,}922$	9,3	20	8,3	36
Produit évolué (humifié)	$K_f = 297$;	$n_f = 0{,}671$	16,3	28	6	8

Le tableau 13 donne les résultats d'une étude basée sur la recherche des groupes fonctionnels actifs (Li et Felbeck, 1962). Il apparaît ainsi que les groupes carboxyliques et hydroxyliques acides jouent un rôle probablement très important. Il existe néanmoins une ambiguïté en ce qui concerne les conséquences réelles des traitements du type présenté dans ce tableau. Il est en effet toujours possible de supposer qu'ils sont la cause des propriétés observées.

TABLEAU 13

Effet sur l'adsorption de l'atrazine de la suppression de différents groupements fonctionnels d'acides humiques

Effect on the adsorption of atrazine of the removal of different functional groups from humic acids

Traitements	Groupements supprimés	p. 100 adsorbé par rapport au témoin
0	—	100
Diazométhane	—COOH ; Phénol —C(=O)—C↔C(—OH)=C	27
	—N(—H)—C(=O)—, O(—H)—C(—COOH)—	
Diméthylsulfate	Tous les groupements sauf COOH	54
Acétate de Ca	—COOH	14

Le rôle des fonctions acides est par contre beaucoup plus certain quand les molécules pesticides peuvent être adsorbées par l'intermédiaire de liaisons ioniques ou de liaisons cation-dipole. Comme dans le cas des argiles, la nature des cations compensateurs est alors très importante. Elle détermine la compétition avec les molécules sous forme cationique telles que les triazines quand l'acidité le permet (Gaillardon, 1975) ou les composés bipyridilium (Burns *et al.*, 1973 ; Khan, 1974*b*). La figure 8 donne un exemple d'une telle compétition.

La nature des cations minéraux intervient également pour fixer l'intensité des liaisons cation-dipole. C'est ainsi que Khan et Mazurkewich (1974) expliquent la décroissance de l'adsorption du linuron par des acides humiques suivant l'ordre :

$$H^+ > Fe^{3+} > Al^{3+} > Cu^{2+} > Ca^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+} .$$

Des observations semblables sont rapportées par Leenher et Ahlrichs (1971) pour l'adsorption du carbaryl et du parathion sur des matières organiques extraites de sols. Ce dernier point est aussi à l'origine d'une interrogation sur le rôle réel des cations, car les variations d'adsorption observées peuvent fort bien provenir de modifications des propriétés des acides humiques plutôt que de l'interaction directe cation-molécule pesticide.

Les colloïdes organiques peuvent également présenter une acidité de surface due aux molécules d'eau d'hydratation. Bien qu'il n'existe pas d'informations sur ce point, il est possible de penser que cet eau joue le même rôle que dans les argiles.

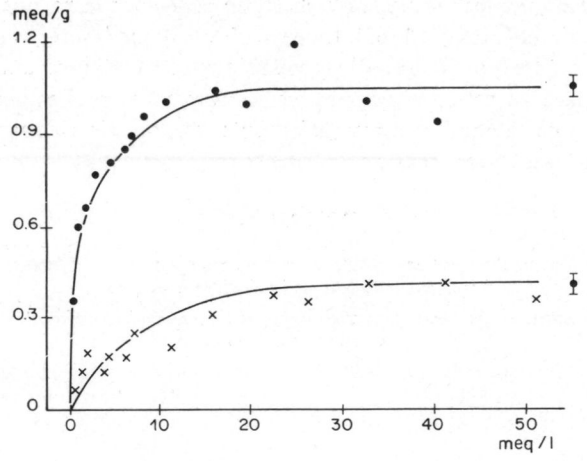


FIG. 8. — *Adsorption du paraquat par des humates calciques, dans l'eau* (•) *et dans une solution de* $CaCl_2$ 0,666 *N* (×) (Burns *et al.*, 1973).
Paraquat adsorption by Ca-humates, in water (•) *and in a* $CaCl_2$ (0,666 N) *solution* (×).

3. *Associations organo-minérales.*

Mis à part les matières organiques fraîches ou en voie de décomposition, les composés organiques du sol sont fréquemment associés aux constituants minéraux. La nature exacte et les propriétés de ces associations sont assez mal connues car leur étude est très difficile. Des informations peuvent être trouvées dans certaines mises au point (Greenland, 1971 ; Schnitzer et Khan, 1972 ; Orlov *et al.*, 1973). Il a notamment été observé que les ions Al^{3+} et Fe^{3+} et leurs oxydes et hydroxydes jouaient un rôle important dans l'établissement de ces associations. Des quelques travaux publiés sur ce sujet, il ressort que leurs propriétés ne sont pas égales à la somme des propriétés des constituants. Le tableau 14 en donne plusieurs exemples.

TABLEAU 14

Adsorption par des associations montmorillonite-humates de calcium
Adsorption by calcium humates-montmorillonite associations

Herbicide	Adsorbant		pH	Caractéristiques de l'adsorption	Auteurs
	Montmorillonite (p. 100)	Humate Ca (p. 100)			
Atrazine	100	0	7,8	$K_d = 11,7$	Hance, 1969
	0	100	7,4	$K_d = 59$	— —
	85	15	7,6	$K_d = 14$	— —
Terbutryne	100	0	3-3,2	$K_f = 0,011$; $n_f = 2,74$	Gaillardon *et al.*,
	0	100	3-3,2	$K_f = 0,71$; $n_f = 0,90$	1977
	75	25	3-3,2	$K_f = 0,38$; $n_f = 1,51$	— —

C. — *Conclusions*

L'énumération très rapide des principales caractéristiques des constituants minéraux et organiques du sol montre que tous les types de liaison peuvent s'établir avec les molécules pesticides. Une analyse détaillée des mécanismes de l'adsorption est donc difficile, voire impossible en raison de l'existence probablement simultanée de plusieurs interactions.

Les constituants minéraux et organiques ne sont pas stables dans le temps. Leur évolution se fait avec des vitesses variables, généralement beaucoup plus lente pour les premiers que pour les seconds. Pour ceux-ci notamment, les transformations peuvent être très rapides en raison de l'activité biologique des sols très intense en certaines saisons. Cette constatation fait que la description des propriétés d'adsorption d'un constituant du sol, même détaillée, n'est sûrement pas suffisante. Il faut lui ajouter une description dynamique qui permette de rendre compte d'une évolution et d'en prévoir une autre.

Ces considérations montrent qu'il n'est pas possible de prévoir exactement la capacité d'adsorption d'un sol à partir de sa composition. Bien qu'on puisse s'attendre à ce qu'une teneur élevée en argile ou en matière organique soient à l'origine d'une adsorption importante, il est difficile de proposer des critères de classement des sols. Nous n'avons pas actuellement de moyens convenables pour repérer, identifier et étudier les différentes associations minérales ou organo-minérales du sol. Comme nous aurons l'occasion de la voir, vouloir relier directement le comportement des sols à leur composition est très souvent difficile.

III. — La température

A. — *Effet de la température sur l'adsorption*

L'effet de la température est très variable, l'adsorption pouvant augmenter, diminuer ou rester constante. Les tableaux 15 rassemblent un assez grand nombre de résultats publiés.

B. — *Quelques éléments d'explication*

Il n'est pas possible de proposer une explication générale permettant de rendre compte de toutes les observations. Rappelons à cet égard que les développements thermodynamiques précédemment donnés montrent qu'une interprétation correcte des valeurs des grandeurs énergétiques n'est possible que si l'existence ou l'absence d'un échange sont connues. Or, s'il est possible de déceler l'existence d'un échange, il n'existe aucun moyen d'en connaître sa stoechiométrie dans le cas de l'adsorption des pesticides. Il est difficile, dans ces conditions, de vouloir utiliser les valeurs des enthalpies d'adsorption pour identifier un type de liaison.

L'étude de l'effet de la température peut néanmoins fournir certains éléments d'explication. La solubilité, donc l'affinité de l'eau pour les molécules organiques est

TABLEAU 15 (1)

Effet de la température sur l'adsorption par des matériaux organiques (tabl. 15 (1)), *des minéraux* (tabl. 15 (2)) *et des sols* (tabl. 15 (3))

Effect of the temperature on the adsorption by organic materials (table 15 (1)), *minerals* (table 15 (2)) *and soils* (table 15 (3))

Auteurs	Adsorbant	Molécules pesticides	Effet de la température sur l'adsorption
Mac Glamery Slife, 1966	Acide humique	Atrazine	+
Dunigan et Mac Intosh, 1971	Acide humique	Atrazine	+
	Lignine		
Li et Felbeck, 1972	Acide humique	Atrazine	+
Harris et Warren, 1964	Tourbe	Monuron	0
		Simazine	0
		Atrazine	0
		2,4 D	0
Weber *et al.*, 1965	Charbon	Prométone	0
		2,4 D	—
	Résine anionique	Prométone	—
Haque et Coshow, 1971	Acide humique	Isocil	—
		Bromacil	—
Mills et Biggar, 1969	Tourbe	γ, β HCH	—
Khan, 1973	Acide humique	2,4-D	—
		Piclorame	—
Leenher et Ahlrichs, 1971	Matières organiques extraites de sol	Parathion Carbaryl	+ ou 0 ou —

0 : pas d'effet,
— : l'adsorption diminue quand la température augmente,
+ : l'adsorption augmente en même temps que la température.
0 : no effect,
— : the adsorption decreases when the temperature increases,
+ : the adsorption increases together with the temperature.

TABLEAU 15 (2)

Auteurs	Adsorbant	Molécules pesticides	Effet de la température sur l'adsorption
Harris et Warren, 1964	Montmorillonite	Simazine	—
	(pH = 8,5)	Monuron	—
		Atrazine	—
Weber *et al.*, 1965	Montmorillonite	Prométone	—
	Montmorillonite	2,4 D	Adsorption
	Kaolinite		négative
Haque et Sexton. 1968	Illite	2,4 D	—
	Montmorillonite	2,4 D	≃ 0
	Silicagel	2,4 D	—
	Alumine	2,4 D	≃ 0
Mills et Biggar, 1969	Bentonite	β HCH	0
		γ HCH	—
Van Bladel et Moreale, 1974	Montmorillonites	Fénuron	—
		Monuron	—
Hayes *et al.*, 1975	Montmorillonite Na	Paraquat	0
	Illite Na	Paraquat	0
	Kaolinite Na	Paraquat	0
	Vermiculite Na	Paraquat	+
	Montmorillonite K	Diquat	0
	Illite K	Diquat	0
	Kaolinite K	Diquat	+
	Vermiculite K	Diquat	+

TABLEAU 15 (3)

Auteurs	Adsorbant	Molécules pesticides	Effet de la température sur l'adsorption
Talbert et Fletchall, 1965	Sols	Atrazine	—
		Simazine	—
Mac Glamery et Slife, 1966	Sols	Atrazine	—
Yamane et Green, 1972	Sols	Atrazine	—
		Amétryne	—
Dao et Lavy, 1978	Sols	Atrazine	+
Biggar et Cheung, 1973	Sols	Piclorame	—
Farmer et Aochi, 1974	Sols	Piclorame	—
Sethi et Chopra, 1975	Sols	Alachlor	—
Harvey, 1974	Sols	12 dinitroanilines	—
Miller et Faust, 1972	Complexe organo-argileux	2,4 D	—
Mills et Biggar, 1969	Sols	γ, β HCH	—
Yaron et Saltzman, 1972	Sols	Parathion	—

une fonction croissante de la température pour tous les pesticides cités dans le tableau 15. Partant de cette observation, un schéma partiellement explicatif peut être avancé (tabl. 16).

TABLEAU 16

Une explication possible de l'effet de la température sur l'adsorption
A possible explanation of the temperature effect on the adsorption

Effet de la température sur l'affinité de la surface pour le soluté	Effet de la température sur l'affinité de l'eau pour le soluté	Effet de la température sur l'adsorption
+ +	+	+
+	+	0
+	+ +	—
0	+	—
—	+	—

0 : effet nul ; — : diminution ; + : augmentation.

L'affinité des acides humiques pour l'atrazine et le bromacil et celle de la vermiculite pour le paraquat et le diquat semblent augmenter en même temps que la température. Cela signifie donc que l'adsorption des pesticides concernés met en jeu un ou plusieurs phénomènes endothermiques. Une analyse détaillée est proposée dans le cas de l'adsorption du diquat et du paraquat sur la vermiculite ; elle est basée sur les variations de l'hydratation des cations minéraux désorbés et sur la désorption des molécules d'eau qui accompagne l'adsorption des cations organiques (Hayes *et al.*,

1975). Pour les autres adsorbants, il n'est pas possible de proposer la moindre hypothèse quant à la variation de leurs propriétés d'adsorption.

De toute évidence, les interactions eau-soluté jouent un rôle important. Nous avons vu qu'il était possible de s'en affranchir en utilisant des concentrations réduites comme variables dans la représentation des isothermes d'adsorption. Plusieurs auteurs ont procédé ainsi et ont alors observé que les isothermes d'adsorption à différentes températures étaient parfois confondues ou tout au moins très voisines (Mills et Biggar, 1969 ; Yamane et Green, 1972 ; Yaron et Saltzmann, 1972 ; Van Bladel et Moreale, 1974 ; Moreale et Van Bladel, 1979). La figure 9 en donne un exemple.

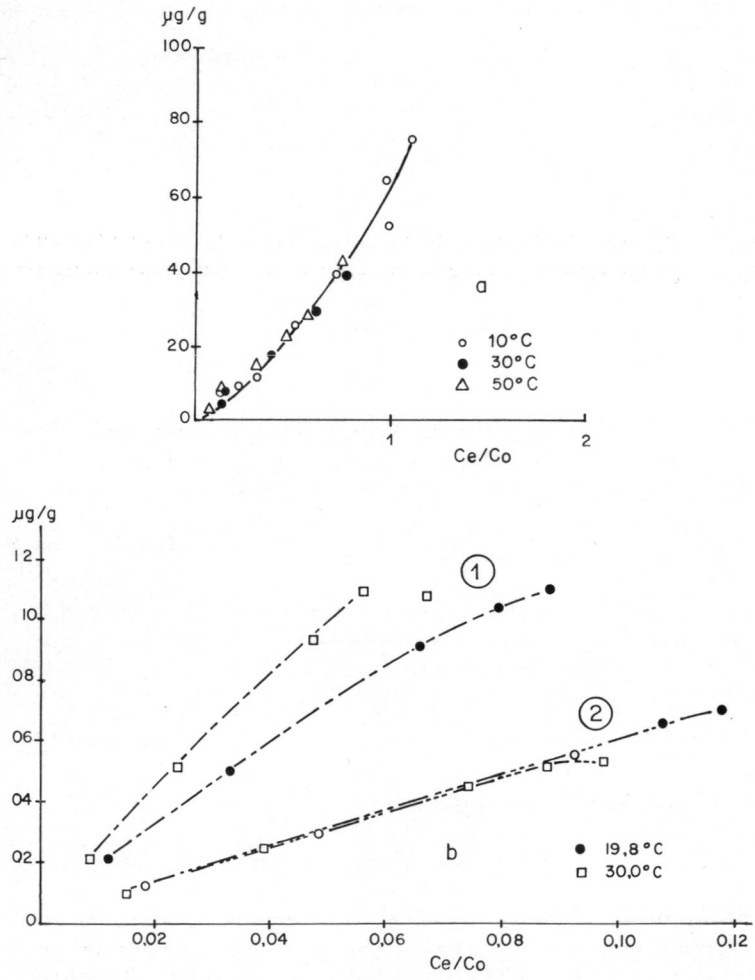


FIG. 9. — *Exemples de variations de la quantité adsorbée en fonction de la concentration réduite. a)* Adsorption du parathion par un sol (Yaron et Saltzman, 1972). *b)* Adsorption du β HCH sur une bentonite calcique (1) et sur le silicagel (2) (Mills et Biggar, 1969).

Examples of variations of the adsorbed quantity against the reduced concentration. a) Adsorption of parathion by a soil. *b)* Adsorption of β HCH on a Ca-bentonite (1) and silicagel (2).

Ces observations confirment l'importance des interactions eau-soluté. L'interprétation des valeurs nulles ou positives de l'enthalpie d'adsorption doit néanmoins tenir compte de la signification de l'utilisation des concentrations réduites. Rappelons en effet que dans ce cas, l'enthalpie déterminée correspond au passage des molécules d'une solution saturée à l'état adsorbé. Une valeur nulle ou positive signifie donc seulement que les interactions soluté surface mettent en jeu les mêmes énergies ou des énergies légèrement inférieures à celles mises en jeu dans la solution saturée.

IV. — Caractéristiques de la phase liquide au contact de l'adsorbant

La phase liquide au contact de l'adsorbant joue un rôle déterminant par sa composition moléculaire et ionique et par son volume comparé à la masse d'adsorbant présente.

A. — *Effet des solvants organiques*

Des solvants organiques ont été assez souvent utilisés dans les études d'adsorption pour des raisons d'ordre méthodologique. La solubilité de très nombreux pesticides est en général bien plus grande dans ces solvants que dans l'eau et leur utilisation permet alors d'obtenir des quantités adsorbées parfois très élevées. Ceci est notamment très utile pour les études spectroscopiques dans le domaine infrarouge. C'est ainsi qu'on note par exemple l'utilisation de solutions chloroformiques d'atrazine par Brown et White (1969), Cruz *et al.* (1968), de solutions benzéniques d'alachlor par Sethi et Chopra (1975), de solutions alcooliques de parathion par Swoboda et Thomas (1968) et d'heptane par Saltzman et Yariv (1976). Ces types de travaux appellent un certain nombre de remarques. Compte-tenu des concentrations élevées des solutions, il est possible de se demander si un phénomène de cristallisation sur les surfaces ne peut pas être confondu avec le phénomène d'adsorption. Dans l'hypothèse où c'est bien de ce dernier dont il s'agit, les mesures effectuées avec des solvants organiques ne peuvent être que d'une utilité très limitée pour apporter des informations sur les mécanismes de l'adsorption à partir des solutions aqueuses. Le solvant joue en effet un rôle déterminant à deux niveaux : dans la phase liquide où il solvate les molécules de solutés, sur la surface où il peut être à l'origine de sites d'adsorption.

Additionnés à l'eau, les solvants organiques peuvent permettre par contre, d'approfondir l'analyse du rôle que peut jouer l'eau dans les phénomènes d'adsorption. L'étude de l'adsorption de l'atrazine par une montmorillonite-Al^{3+} déshydratée à partir de différents mélanges eau-solvant organique, montre que (Calvet et Tercé, 1975) :

- la présence d'éthanol diminue l'adsorption quand la teneur en alcool est supérieure à 20 p. 100 (fig. 10),
- les solvants très polaires mais aprotiques (acétone, DMSO) suppriment ou réduisent très fortement l'adsorption,
- l'adsorption est d'autant plus élevée que les solvants donneurs de protons s'ionisent facilement.

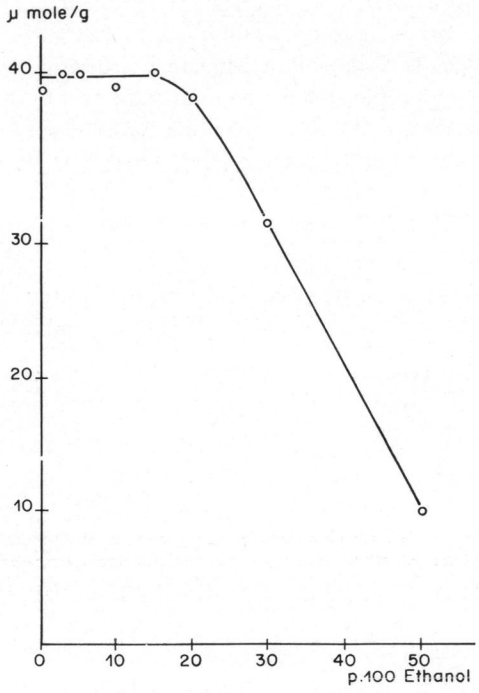


FIG. 10. — *Variation de la quantité d'atrazine adsorbée sur une montmorillonite Al^{3+} chauffée en fonction de la quantité d'éthanol présente dans le milieu* (Calvet et Tercé, 1975).

Plot of the amount of adsorbed atrazine on an heated Al-montmorillonite against the ethanol content of the medium.

Cette étude met en évidence le rôle fondamental de l'eau d'hydratation de la surface de l'argile. Les molécules d'eau sont en effet des sites d'adsorption où les molécules d'atrazine sont retenues par des liaisons hydrogène. Il en résulte par conséquent, l'existence d'une compétition entre les molécules d'eau et les molécules d'herbicide.

Les mélanges eau-solvants organiques ont aussi été utilisés pour tenter d'étudier l'influence de la teneur en eau. Nous reviendrons sur ce point dans un prochain paragraphe.

B. — *Composition ionique de la phase aqueuse*

1. *Acidité de la solution.*

a) *Effet global.*

L'effet de l'acidité sur l'adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants est décrit dans de nombreux travaux. Les molécules concernées sont les bases faibles et les acides faibles. Un certain nombre d'exemples de systèmes étudiés sont donnés dans le tableau 17.

TABLEAU 17

Différents systèmes pesticide-adsorbant utilisés dans l'étude de l'effet de l'acidité
Different adsorbent-pesticide systems used for the study of the effect of the acidity

Nature des pesticides	Adsorbant	Auteurs
Bases faibles	Colloïdes minéraux	Frissel et Bolt, 1962 Weber, 1966 Bailey *et al.*, 1968 Hance, 1969 Weber, 1970 Vallet *et al.*, 1973 Aharonson et Kafkafi, 1975
	Matières organiques	Weber *et al.*, 1969 Nearpass, 1969 Gaillardon *et al.*, 1975
	Sols	Talbert et Fletchall, 1965 Mc Glamery et Slife, 1966 Aharonson et Kafkafi, 1975
Acides faibles	Colloïdes minéraux	Frissel et Bolt, 1962 Bailey *et al.*, 1968 Watson *et al.*, 1973
	Matières organiques	Nearpass, 1969
	Sols	Cheung, 1973 Kuo, 1973

L'influence des variations de l'acidité du milieu dépend à la fois de la nature des molécules pesticides et de la nature de l'adsorbant. La figure 11 donne les différents types d'effets observés.

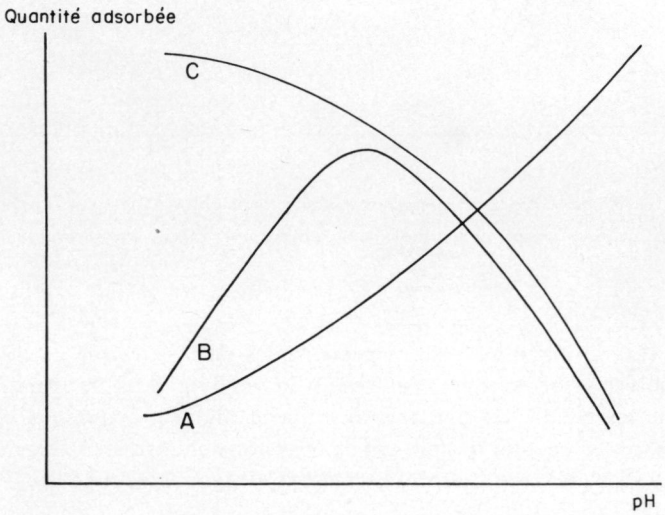


FIG. 11. — *Différents types de variations de l'adsorption dues à des variations de l'acidité.*
Types of variations of the adsorption due to acidity changes.

Dans certains cas, l'adsorption passe par un maximum (courbe B) à une valeur de pH (pHm) parfois située au voisinage de la valeur du pK_a de la molécule pesticide. La figure 12 représente un ensemble de couples de valeurs (pH_m, pK_a) trouvés dans différentes publications citées dans ce travail. Il apparaît que ces deux valeurs ne coïncident pas et sont même parfois très différentes pour des pK_a supérieurs à 4.

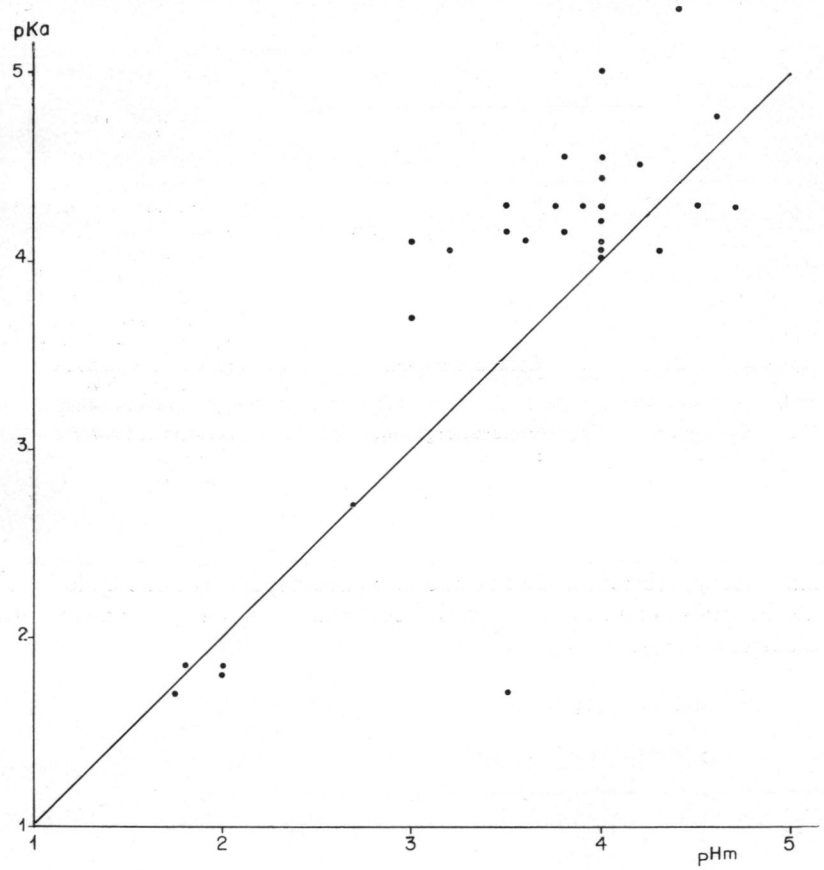


FIG. 12. — *Relation entre le pH du maximum d'adsorption observé* (pH_m) *et la valeur du* pK_a.
Relation between the pH of the maximum of adsorption (pH_m) *and the value of* pK_a.

b) *Interprétation.*

L'interprétation des observations précédentes doit tenir compte de deux effets : l'un sur les molécules organiques, l'autre sur l'adsorbant. Il est important de rappeler à ce sujet que les propriétés des argiles et de la matière organique sont modifiées par des variations d'acidité, du fait soit de transformations réversibles comme l'ionisation des groupes OH, soit de transformations irréversibles telle que l'altération du réseau cristallin de l'argile.

Les courbes du type A (cf. fig. 11) s'observent quand des pesticides à caractère basique faible s'adsorbent essentiellement sous forme de molécules neutres. Ce sont les

cas de l'adsorption de l'atrazine et de la simazine sur des charbons (Yamane et Green, 1972) et de la terbutryne sur la montmorillonite saturée par l'aluminium (Calvet et Tercé, 1978).

Les courbes de type B et C (cf. fig. 11) sont observées en trois circonstances :

- adsorption des molécules à caractère basique faible sur des adsorbants portant des charges électriques négatives (argiles, acides humiques),
- adsorption des molécules à caractère acide faible sur des adsorbants portant des charges électriques positives (oxydes, hydroxydes),
- adsorption des molécules neutres sur des argiles.

Bien que l'origine du maximum ait été souvent discutée il faut souligner que son existence n'est pas entièrement certaine, du moins pour l'adsorption des bases faibles. Ceci provient du fait que de nombreux résultats concernent la comparaison de quantités adsorbées à des concentrations à l'équilibre (Ce) différentes. Il est plus exact d'étudier l'effet de l'acidité pour des valeurs de Ce constantes comme l'ont fait Frissel et Bolt (1962).

Dans le cas des bases faibles, le maximum est attribué à une compétition entre les molécules organiques ionisées et les protons pour les sites d'échange des argiles et de la matière organique. Pour celle-ci d'ailleurs, la diminution de l'adsorption aux faibles pH peut provenir de la disposition des sites eux-mêmes. Pour les acides faibles et les hydroxydes, Watson *et al.* (1973) ont montré que les résultats obtenus avec le 2, 4-D et la goethite pouvaient s'expliquer en tenant compte des variations de la charge de la surface et de l'ionisation du pesticide.

L'acidification d'une suspension d'argile entraîne toujours une altération du réseau cristallin. En milieu acide, on a donc toujours affaire à une argile partiellement saturée par des ions aluminium. Ceci a deux conséquences :

- l'ionisation des bases faibles n'est peut être pas la seule explication des comportements observés quand l'acidité varie,
- l'augmentation de l'acidité peut amener un accroissement de l'adsorption de molécules neutres comme les urées, probablement du fait de l'établissement de liaisons de coordinations avec les ions Al^{3+} ou des liaisons hydrogène avec leurs molécules d'eau d'hydratation. C'est ainsi que Tercé et Calvet (1977) ont expliqué l'augmentation de l'adsorption du méthabenzthiazuron qui accompagne l'acidification d'une montmorillonite calcique.

2. *Effet des sels.*

Le tableau 18 donne quelques résultats expérimentaux relatifs à l'effet des sels. Quand la force ionique est supérieure à 1, l'adsorption augmente avec la concentration saline ; quand elle est inférieure à 1, l'effet est variable. Dans le premier cas, l'explication généralement avancée repose sur la diminution de la solubilité des molécules pesticides quand la force ionique augmente. Cet effet d'exclusion (salting out effect) serait à l'origine d'un accroissement de l'adsorption. Ceci est plausible mais non évident pour deux raisons. Les observations relatives à l'influence de la solubilité sur l'adsorption sont contradictoires (tabl. 5), et par ailleurs, la possibilité d'une précipitation des composés organiques sur les surfaces ne peut pas être exclue (Abernaty et Davidson 1971 ; Watson *et al.*, 1973 ; Farmer et Aochi, 1974). Dans le

TABLEAU 18

Effets des sels sur l'adsorption
Effects of salts on the adsorption

Auteurs	Adsorbant	Molécules pesticides	Effet de la concentration saline sur l'adsorption $\mu < 1$	$\mu > 1$	Sels	Conditions expérimentales
Van Bladel, 1971	Montmorillonite Na	Fénuron	—	+	NaCl	
Van Bladel et Moreale, 1974	Montmorillonite Na Mg Ca	Fénuron Monuron	0 ou —	+	NaCl $MgCl_2$ $CaCl_2$	mêmes concentrations
Gaynor, 1973	Sols	Terbutryne Atrazine	—	+	NaCl KCl $CaCl_2$	mêmes forces ioniques
Dao et Lavy, 1978	Sols	Atrazine	+		$CaCl_2$	
Watson *et al.*, 1973	Goethite	2,4 D	—	+	NaCl	
Hurle et Freed, 1972	Sols	S-triazines Urées substituées	+		KCl NH_4Cl $CaCl_2$	mêmes forces ioniques
Farmer et Aochi, 1974	Sols	Piclorame	+		KCl $CaCl_2$	mêmes concentrations
Abernaty et Davidson, 1971	Sols	Prométryne Fluométuron	+ —		NaCl $CaCl_2$	mêmes concentrations
Aharonson et Kafkafi, 1975	Montmorillonite Ca Kaolinite Na	Thiabendazole BMC	—		$CaCl_2$	0,01 à 1 N

μ : force ionique ;
0 : pas d'effet ;
— : l'adsorption diminue quand la force ionique augmente ;
+ : l'adsorption augmente en même temps que la force ionique.
μ : ionic strength ;
0 : no effect ;
— : the adsorption decreases as the ionic force increases ;
+ : the adsorption increases together with the ionic force.

second cas, les effets observés avec de faibles concentrations sont plus difficiles à expliquer. Des hypothèses basées sur le rôle du potentiel de la couche diffuse ont été avancées. Elles ne sont cependant pas très convaincantes car elles considèrent que des composés tels que les urées peuvent être protonées sur la surface des colloïdes. Compte tenu de la valeur de leur pK_a (— 1, — 2), ceci semble assez peu probable. Dans ces conditions, il faut alors invoquer des modifications des propriétés de l'adsorbant liées à des changements d'agrégation et d'hydratation des surfaces.

Quelques observations peuvent recevoir une explication assez simple. Quand les molécules sont adsorbées par l'intermédiaire de liaisons ioniques, l'augmentation de la concentration en sel accroît la compétition avec les ions minéraux. Des exemples de cet effet ont été donnés dans le paragraphe II-A-1-b.

C. — *Rôle des adjuvants de formulation*

Les pesticides sont toujours utilisés sous forme de produits formulés contenant un certain nombre d'adjuvants tels que des diluants et des produits émulsifiants par exemple (Furmidge, 1972 ; Turner, 1974 ; Kanellopoulos, 1974).

Il est donc justifié de s'interroger sur l'influence que ces composés peuvent avoir sur l'adsorption des pesticides. Il est cependant difficile de proposer une règle générale à la suite des observations publiés en raison de leur grande variabilité (Bayer, 1967 ; Smith et Bayer, 1967 ; Huggen-Berger *et al.*, 1973 ; Kanellopoulos, 1974). Les résultats expérimentaux montrent en effet que les adjuvants peuvent plus ou moins influencer l'adsorption ou n'avoir aucune action.

La désorption semble toutefois devoir être affectée. Mingelgrin et Yaron (1974) ont ainsi observé que des insecticides chlorés étaient plus facilement désorbés de la surface d'une argile quand l'adsorption avait eu lieu à partir d'un produit formulé.

Ce domaine devrait faire l'objet d'un plus grand nombre d'études en raison des applications évidentes qu'ils seraient éventuellement possible d'en tirer. Il existe cependant une difficulté notable liée à l'absence d'informations sur la composition des formulations, qui peut expliquer le peu d'enthousiasme des chercheurs à entreprendre des travaux sur ce problème.

D. — *Rôle de la teneur en eau*

La grande majorité des mesures d'adsorption sont faites sur des suspensions diluées. Ce sont cependant des conditions très éloignées de la réalité tout au moins en ce qui concerne les teneurs en eau.

Une variation de l'état d'hydratation peut avoir plusieurs conséquences. Elle peut modifier l'agrégation de l'adsorbant et augmenter ou diminuer les surfaces accessibles aux molécules de soluté. C'est ainsi que certains résultats ont été interprétés (Green et Obien, 1969 ; Grover et Hance, 1970). Elle peut aussi entraîner des modifications des propriétés de la surface de l'adsorbant. Cet aspect est beaucoup plus difficile à étudier. Calvet et Tercé (1975) ont observé que la quantité d'atrazine adsorbée par une montmorillonite calcique augmente quand la teneur en eau diminue (tabl. 19). Cette augmentation est attribuée à l'effet de l'acidité de surface de l'argile.

Une semblable variation est également notée par Hance (1977) pour l'adsorption du monuron et de l'atratone par des sols (fig. 13).

TABLEAU 19

Adsorption de l'atrazine par des gels de montmorillonite calcique
(Calvet et Tercé, 1975)
Adsorption of atrazine by calcium montmorillonite gels

Teneur en eau des gels de montmorillonite calcique p. 100 d'argile séchée à 250 °C	Quantité d'atrazine adsorbée µg/g
1 000	0
500	9
400	10
300	22
250	27
200	30

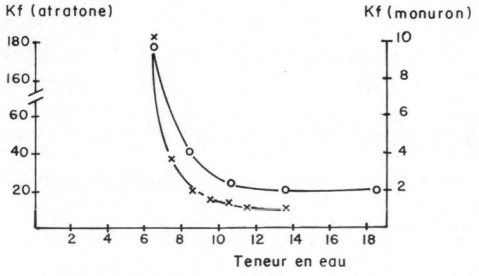


FIG. 13. — *Variations de la constante d'adsorption K_f en fonction de la teneur en eau du sol pour l'atratone* (o) *et le monuron* (×) (Hance, 1977).

Plot of the adsorption constant K_f against the soil water content for atratone (o) *and monuron* (×).

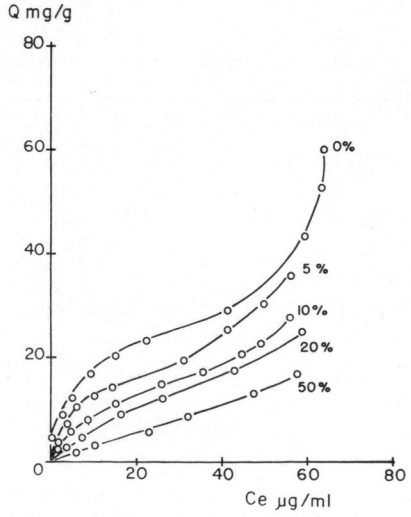


FIG. 14. — *Isothermes d'adsorption du dibromure d'éthylène par un sol en équilibre avec différentes humidités relatives* (Call, 1957).

Adsorption isotherms of ethylene dibromide by a soil in equilibrium with various relative humidities.

Pour cette étude, l'auteur utilise un solvant non miscible à l'eau pour réaliser des systèmes à différentes teneurs en eau. Dans ces conditions, l'interprétation des résultats pourrait être complétée s'il était possible de connaître la répartition réelle de l'eau et du solvant organique sur les surfaces des colloïdes.

D'autres observations vont également dans le même sens. Ce sont celles de Scott et Lutz (réf. cit. in Savage et Wauchope, 1974) pour l'adsorption du fluométuron sur la kaolinite et celle de Farmer et Aochi (1974) pour l'adsorption du piclorame sur des sols.

L'effet de la teneur en eau du sol est particulièrement marquée avec les pesticides gazeux (Call, 1957 ; Spencer *et al.*, 1969). L'explication avancée repose sur l'existence d'une compétition entre les molécules d'eau et les molécules organiques. Il en résulte des isothermes d'adsorption de forme très variable comme l'illustre la figure 14.

Reçu pour publication en février 1979.

Remerciements

Nous remercions vivement Messieurs R. Hance (Weed Research Organization, Oxford, England) et J. Lhoste (Roussel-UCLAF, Paris) pour l'aide qu'il nous ont apportée dans la rédaction de ce mémoire.

Summary

Bibliographic review

Adsorption of pesticides by soils and their constituents

II. — *The factors of the adsorption*

Effects of the following factors are studied : molecular properties, adsorbent properties, temperature and characteristics of the liquid phase used for the measurements.

The presence of electric charges (ionized molecules), the polarity and the polarisability are determined by the electronic structure. The nature of the solute-surface bonds depends on these properties and the ability of the molecule to be ionized. According to some works, the molecular volume may play a part. Also very important is the hydrophylic/hydrophobic balance of the molecules but no general relationship has been found between adsorption and water solubility. However, affinity of pesticide molecules for organic solvents has lead to interesting information.

Soil mineral adsorbents are clays, oxides and hydroxides. Adsorption properties of clays are variable according to their origin and to the nature of compensating cations which can also act as sites for adsorbed molecules. Adsorption by free or associated hydroxides may be noticeable and this may explain the effect of weathering. Adsorption by organic materials is generally hight but may be modified during humification processes. As for clays, the nature of exchangeable mineral cations can play an important part. Mineral and organo-mineral associations may have interesting properties but these are not well known.

The effect of the temperature on adsorption is variable according to the nature of the pesticide molecules and of the adsorbents. The composition of the solution at the moment of the measurement is also important : the acidity determines the ionization of molecules and may modify the adsorbents's properties ; adsorption may undergo some variations due to dissolved salts. Finally, water content of pesticide-adsorbent systems may be an important factor : it can control the accessibility of surfaces and determines at least partially the physico-chemical properties of the adsorbents. This last point is one of the less studied.

Zusammenfassung

Schriftumsstudie
Pestizidenadsorption durch die boden und deren bestandteile

II. Adsorptionsfaktoren

Die Wirkungen der folgenden Faktoren : die Eigenschaften der Pflanzenschutzmittelmoleküle und der Bodenadsorptionsmittel, die Temperatur und die Merkmale der flüssigen Phase in Berührung mit dem Adsorptionsmittel sind beschrieben und beurteilt.

Die Elektronenstruktur der Moleküle wirkt durch die Anwesenheit von L Laden (ionisierte Moleküle), die Polarität und Polarisationsfähigkeit. Sie bedingt unmittelbar die Beschaffenheit der Verbindungen, die an der Oberfläche entstehen. In dieser Hinsicht ist die Fähigkeit zur Ionisierung auschlagsgebend. Nach gewissen veröffentlichten Ergebnissen scheint das Molekularvolumen eine Rolle zu spielen. Es ist sehr wichtig, die « Solvation » der Moleküle durch Wasser und organische Lösungsmittel zubetrachten. Es gibt keine allgemeine Beziehung zwischen der Adsorption und der Lösbarkeit ins Wasser aber die Affinität der Pflanzenschutzmittel für die organischen Lösungsmittel kann manchmal interessante Daten geben.

Die adsorbierenden Mineralien des Bodens sind die Tonerden, die Oxyde und Hydroxide. Die Adsorptionsmerkmale der Tonerden wechseln sehr nach ihre Gesteinsherkunft und der Beschaffenheit der Ausgleichskationen. Diese können dazu, die Rolle von Adsorptionslagen spielen. Die freien oder verbundenen Hydroxide können ein bedeutende Adsorption verursachen und die möglichen Wirkungen der Mineralien erklären. Die organischen Marerialien zeigen gewöhnlich eine höhe Adsorptionsfähigkeit, die dennoch während der Humifizierung variieren kann. Die Beschaffenheit der Mineralischen Kationen, die die Humussubstanzen sättigen, spielt auch eine wichtige Rolle. Die mineralischen und organomineralischen Verbindungen zeigen manchmal höhe Adsorptionsfähigkeiten, die aber wenig untersucht worden sind.

Die Messungstemperatur hat einen sehr wechselnden Einfluss auf die Adsorption gemäss der Beschaffenheit der Adsorptionsmittel und der Moleküle. Die Zuzammensetzung der Lösung in Berührung mit dem Adsorptionsmittel spielt auch eine wichtige Rolle. Der Saüregrad bestimmt die Ionisation der Moleküle und die Anwesenheit von mineralischen Salzen ändert manchmal die adsorbierten Mengen ohne dass einfache Erklärungen behauptet sein können. Schliesslich kann der Wassergehalt des Pflanzenschutzmittel-adsorptionsmittel Systems wirken, indem er die Oberflächezugänglichkeit bedingt oder die physikalisch-chemischen, Eigenschaften verändert. Es ist ein der am wenigstens studierten Themen.

РЕЭЮМЕ

Библиографическое обозрение адсорбция пестицдов в почвах и в компонентах почв.

II. Факторы адсорбции.

КАЛЬВЕ Р., ТЕРСЕ М., АРВЬО Ж.

Авторы описывают и анализируют влияние разных факторов (свойства молекул пестицидов, свойства адсорбирующих веществ в почве, температура, характер жидкой фазы в контакте с адсорбентом).

Электронная структура молекулы выражается в присутствии зарядов (ионизированные молекулы), в полярности и поляризуемости. Она определяет непосредственно характер связей с поверхностью. Ионизирующая способность играет большую роль в этом явлении. По данным литературы молекулярный объём играет тоже определённую роль. Очень важно принимать во внимание сольватацию молекул водой и органическими растворителями. Между адсорбцией и растворимостью в воде общей зависимости нет, но сродство пестицидов к органическим растворителям даёт иногда интересные сведения.

Глина, окиси и гидроокиси являются адсорбирующими минералами почвы. Адсорбирующие свойства глины зависят от её минералогического происхождения и от природы катионов компенсации, которые могут играть роль места адсорбции. Свободные и связанные гидроокиси могут вызывать значительную адсорбцию и объяснять следствия изменения минералов. Вообще органический материал имеет высокую адсорбирующую способность, которая может меняться в течение образования гумуса. Характер минеральных катионов,

насыщающих гумусные вещества, играет тоже решительную роль. Минеральные и минералоорганические ассоциации представляют иногда значительные адсорбирующие свойства, которые мало изучались.

Температура измерений оказывает очень изменчивое влияние на адсорбцию в зависимости от характера адсорбирующих веществ и молекул. Состав раствора в контакте с адсорбентом тоже играет важную роль. Кислотность определяет ионизацию молекул и присутствие минеральных солей изменяет иногда количество адсорбата, но трудно понять это явление. Наконец, содержание воды в системе пестицид-адсорбент может определить доступность поверхностей или изменить их физико-химические свойства. Последний вопрос изучался меньше всех.

Références bibliographiques

ABERNATY J. R., DAVIDSON J. M., 1971. Effect of calcium on prometryne and fluometuron adsorption in soil. *Weed Sci.* **19** (5), 517-521.

AHARONSON N., KAFKAFI U., 1975. Adsorption, mobility, persistence of thiabendazole and methyl 2 benzimidazole carbamate in soil. *Agric. food chem.* **23** (4), 720-724.

ARNOLD J., 1972. *Some physical and chemical aspects of the adsorption of* 4-amino-3, 5, 6. *Trichloropicolinic acid by soil and soil colloids.* Ph. D. Agronomy, University of California. Riverside.

ARVIEU J. C., 1980. Recherches sur le comportement du bromure de méthyle dans le sol : étude de sa dissolution aqueuse. *Ann. agron.* (à paraître).

BAILEY G. W., WHITE J. L., 1970. Factors influencing the adsorption, desorption and movement of pesticides in soils. *Residue Rev.* **32,** 29-92.

BAILEY G. W., WHITE J. L., ROTHBERG T., 1968. Adsorption of organic herbicides by montmorillonite-role of pH and chemical character of adsorbate. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **32,** 222-234.

BAYER D. E., 1967. Effect of surfactants on leaching of substitued urea herbicides in soil. *Weeds* **15,** 249-252.

BIGGAR J. W., CHEUNG M. W., 1973. Adsorption of picloram (4 amino 3, 5, 6, trichloro picolinic acid) on Panoche, Ephrata and Palouse soils. A thermodynamic approch to the adsorption mechanism. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **37,** 863-868.

BRIGGS G. G., 1969. Molecular structure of herbicides and their sorption by soils. *Nature* **223.**

BRIGGS G. G., 1973. A simple relationship between soil adsorption of organic chemicals and the octanol/water partition coefficients. *Proc 7th British Insectic. Fungic. Conf.* 1, 83-86.

BOWMAN B. T., ADAMS R. S., FENTON S. W., 1970. Effects of water upon malathion adsorption onto five montmorillonite systems, *J. Agric. Food. Chem.* **18,** 723-727.

BOWMAN B. T., 1973. The effect of saturating cations on the adsorption of Dasanit. 0,0 diethyl 0 [p. (méthylsulfinyl) phenyl] phosphorothioate by montmorillonite suspension. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **37,** 200-207.

BOWMAN B. T., SANS W. W., 1977. Adsorption of parathion fenitrothion, methylparathion and paraaxon by Na^{+}, Ca^{++} and Fe^{3+} montmorillonite suspensions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* **41,** 514-519.

BROWN C. B., WHITE J. L., 1969. Reactions of 12 s-triazines with soil clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33** (6), 863-867.

BURDON J., HAYES M. H. B., PICK M. E., 1975. Cited in HAYES M. H. B., PICK M. E. and TOMS B. A., 1975. Interaction between clay minerals and bipyridylium herbicides. *Residue Rev.* **57,** 1-25.

BURNS R. G., MICHAEL M., HAYES M. H. B., STACEY M., 1973. Spectroscopic studies on the mechanisms of adsorption of paraquat by humic acid and model compounds. *Pest. Sci.* **4,** 201-209.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1963. *Mineralogie des argiles.* Masson et Cie, Editeurs Paris, 350 p.

CALL F., 1957*a*. The mechanism of sorption of ethylene dibromide in moist soils. *J. Sci. Food Agric.* **8,** 639-639.

CALVET R., CHAUSSIDON J., CLOOS P., DE KIMPE, FRIPIAT J., GASTUCHE M. D., HELSEN J., JELLI A., LEONARD A., PONCELET G., UYTTERHOEVEN J., 1964. Protons de constitution, protons libres et eau adsorbée. *Bulletin du groupe français des argiles* **XIV** (9), 59-98.

CALVET R., TERCÉ M., 1975. Solubilité de l'atrazine dans des gels de montmorillonite calcique. *C. R. Acad. Sci.* **281,** Paris.

CALVET R., TERCÉ M., LE RENARD J., 1975. Cinétique de dissolution dans l'eau de l'atrazine, de la propazine et de la simazine. *Weed Res.* **15,** 387-392.

CALVET R., TERCÉ M., 1978. Effet de l'acidité sur l'adsorption de la terbutryne par la montmorillonite. *Communication présentée au groupe français des argiles le* 28 *novembre* 1978, *Paris.*

CHEUNG H. W., 1973. *Equilibrium and kinetic processes of the interactions of* 4-*amino* 3, 5, 6-*Trichloropicolinic acid* (*Picloram*) *and* 0,0-*Diethyl*-0. *p nitrophenyl phosphorothioate* (*Parathion*) *with soils.* University of California. Davis. Ph. D. Agronomy.

CRUZ M., WHITE J. L., RUSSELL J. D., 1968. Montmorillonite s-triazine interaction. *Isr. J. Chem.* **6,** 315-323.

DAO T. H., LAVY T. L., 1978. Atrazine adsorption on soil as influenced by temperature, moisture content and electrolyte concentration. *Weed Sci.* **26** (3), 303-308.

DOHERTY P. J., WARREN G. F., 1969. The adsorption of four herbicides by different types of organic matter and a bentonite clay. *Weed Res.* **9,** 20-26.

DUNIGAN E. P., MAC INTOSH Th. 1971. Atrazine soil organic matter interaction. *Weed Sci.* **19,** 279-282.

FARMER W. J., AOCHI Y., 1974. Picloram sorption by soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38** (3), 418-423.

FREED V. H., 1966. Chemistry of herbicides. *Amer. Soc. Agron. As. A. Spec. Publ.* **8,** 25-43 REF 64. 9 AM 3.

FRISSEL M. F., BOLT G. H., 1962. Interaction between certain ionizable organic compounds (herbicides) and clay minerals. *Soil Sci.*, 93-94.

FURMIDGE C. G. L., 1972. General principles governing the behavior of granular formulation. *Pest. Sci.* **3,** 745-751.

GAILLARDON P., 1975. Etude des phénomènes de sorption entre deux triazines herbicides et des acides humiques. *Weed Res.* **15,** 393-399.

GAILLARDON P., CALVET R., ROUGETET E., GAUDRY J. C., 1978. Etudes préliminaires du rôle de la nature des matières organiques dans les phénomènes d'adsorption des herbicides. *Ann. agron.* **29** (3), 243-256.

GAILLARDON P., CALVET R., TERCÉ M., 1977. Adsorption et désorption de la terbutryne par une montmorillonite Ca et des acides humiques seuls ou en mélanges. *Weed Res.* **17,** 41-48.

GAYNOR J. D., 1973. Atrazine terbutryne and 6 s 14254 adsorption desorption and solubility in salt solutions and movement in soil materials. *Diss. Abst. int Ser.* B **34** (3), 951.

GORING C. A. I., HAMAKER J. W., 1972. *Organic chemicals in the soil environment.* vol. I, Marcel Dekker INC, New York, 440 p.

GREEN R. E., OBIEN S. R., 1969. Herbicide equilibrium in soils in relation to soil water content. *Weed Sci.* **17,** 514-519.

GREENLAND D. J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soil II. Adsorption of organic compounds and its effect on soil properties. *Soils Fertil.* **28,** 521-532.

GREENLAND D. J., 1971. Interaction between humic and fulvic acids and clays. *Soil Sci.* **111** (1), 34-41.

GRIM R. E., 1968. *Clay mineralogy* (2nd edition). Mc Graw Hill Book Company New York St Louis San Francisco Toronto, London Sydney.

GROVER R., 1974. Adsorption and desorption of trifluraline, triallate and diallate by various adsorbents. *Weed Sci.* **22** (4), 405-408.

GROVER R., 1975. Adsorption and desorption of urea herbicides on soils. *Can. J. Soil Sci.* **55** (2), 127-136.

GROVER R., HANCE R. J., 1970. Effect of ratio of soil to water on adsorption of linuron and atrazine. *Soil Sci.* **109** (2), 136-138.

HANCE R. J., 1965. The adsorption of urea and some of its derivatives by a variety of soils. *Weed Res.* **5,** 108-114.

HANCE R. J., 1967. Relationship between partition data and the adsorption of some herbicides by soils. *Nature* **214,** 630-631.

HANCE R. J., 1969. Influence of pH exchangeable cation and the presence of organic matter on the adsorption of some herbicides by montmorillonite. *Can. J. Soil Sci.* **49,** 357-364.

HANCE R. J., 1971. Complex formation as an adsorption mechanism for linuron and atrazine. *Weed Res.* **11,** 106-110.

HANCE R. J., 1977. The adsorption of atraton and monuron by soils at different water contents. *Weed Res.* **17** (3), 197-201.

HAQUE R., COSHOW W. R., 1971. Adsorption of isocil bromacil from aqueous solutions on some mineral surfaces. *Envir. Sci. Techn.* **5,** 139-141.

HAQUE R., LINSTROM F. T., FREE V. H. SEXTON R., 1968. Kinetic study of the sorption of 2.4 D on some clays. *Env. Sci. Techn.* **2,** 207-211.

HAQUE R., SEXTON R., 1968. Kinetic and equilibrium study of the adsorption of 2.4 Dichlorophenoxy acetic acid on some surfaces. *J. Colloïd Interface Sci.* **27** (4), 818-827.

HARRIS C. I., WARREN C. F., 1964. Adsorption and desorption of herbicides by soil. *Weeds* **12,** 120-126.

HARVEY R. G., 1974. Soil adsorption and volatility of dinitroaniline herbicides. *Weed Sci.* **22** (2), 120-124.

HAYES M. N. B., PICK M. E., TOMS B. A., 1975. Interaction between clay and bipyridylium herbicides. *Residue Rev.* **57,** 1-25.

HILTON H. V. YUEN Q. H., 1963. Adsorption of several preemergence herbicides by hawaïan sugar cane soils. *J. Agr. food Chem.* **11,** 230-234.

HUGGENBERGER F., LETEY J., FARMER W. J., 1973. Effect of two nonionic surfactants on adsorption and mobility of selected pesticides in a soil system. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **37,** 215-219.

HURLE K., FREED V. H., 1972. Effect of electrolytes on the solubility of some 1, 3, 5 triazines and substituted ureas and their adsorption on soil. *Weed Res.* **12** (1), 1-10.

JORDAN L. S., 1970. Foreword. *Residue Rev.* **32,** VII-XIII.

KANELLOPOULOS A. G., 1974. Additives in herbicide formulations. *Eng. Chem. Ind.* **23,** 951-955.

KEARNEY P. C., KAUFMAN D. D., 1975. *Chemistry degradation and mode of action.* Edited by Dekker M. Inc New York and Basel, 500 p.

KHAN S. U., 1973. Equilibrium and kinetic studies of the adsorption of 2, 4-D and picloram on humic acid .*Can. J. Soil Sci.* **53,** 429-434.

KHAN S. U., 1974*a*. Adsorption of linuron by montmorillonite. *Can. J. Soil Sci.* **54,** 235-237.

KHAN S. U., 1974*b*. Adsorption of bipyridylium herbicides by humic acid. *J. Environ. Qual.* **3** (3), 202-206.

KHAN S. U., MAZURKEWICH R., 1974. Adsorption of linuron on humic acid. *Soil Sci.* **118** (5), 339-343.

KONONOVA M. H., 1961. *Soil organic matter.* Pergamon Press. Oxford London New York Paris, 450 p.

KUO D. R., 1973. The reactions of picloram and 2, 4-D with montmorillonite clays and soils. *Diss. Abst. Int. Ser. B* **34** (3), 952-953.

LAMBERT S. M., 1967. Functional relationships between sorption in soil and chemical structures. *J. Agr. Food. Chem.* **15** (4), 572-576.

LEENHEER J. A., AHLRICHS J. L., 1971. A klinetic and equilibrium study of the adsorption of carbaryl and parathion upon soil organic matter surfaces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **35,** 700-704.

LEISTRA M., 1970. Distribution of 1,3-dichloropropène over the phases in soil. *J. Agric. Food Chem.* **18,** 1124-1126.

LEOPOLD A. C., Van SCHAIK P., NEAL M., 1960. Molecular structure and herbicide adsorption. *Weeds* **8,** 48-54.

LI G. C., FELBECK G. T., 1972. A study of the mechanism of atrazine adsorption by humic acid from muck soils. *Soil Sci.* **113** (2), 140-148.

MAC GLAMERY M., SLIFE F. W., 1966. The adsorption and desorption of atrazine as affected by pH temperature and concentration. *Weeds* **14,** 237-239.

MILLER R. W., FAUST S. D., 1972. Sorption from aqueous solutions by organic clays 2, 4-D bentone. *Adv. in chemistry series* **111,** 121-134.

MILLS A. C., BIGGAR J. W., 1969. Solubility temperature effects on the adsorption of γ and βHHC from aqueous and hexane solutions by soil materials. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33,** 210-216.

MINGELGRIN U., YARON B., 1974. The effect of calcium salts on the degradation of parathion in sand and soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38** (6) 914-917.

MOREALE A., VAN BLADEL R., 1979. Soil interactions of herbicide derived aniline residues. A thermodynamic approach. *Soil Sci.* **127** (1), 1-9.

MORITA H., 1976. Linuron adsorption and the degree of decomposition of peats as measured by rubbed fiber content and pyrophosphate index. *Can. J. Soil Sci.* **56** (2), 105-109.

MORTLAND M. M., 1970. Clay organic complexes and interactions. *Adv. Agron.* **22,** 75-114.

MORTLAND M. M., FRIPIAT J. J., CHAUSSIDON J., UYTTERHOEVEN J., 1963. Interaction between ammonia and expanding lattices of montmorillonite and vermiculite. *J. Phys. Chem.* **67,** 248-254.

MORTLAND M. M., FARMER V. C., RUSSEL J. D., 1969. Reactivity of montmorillonite surfaces with weak organic bases. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33** (5), 818.

NEARPASS D. C., 1979. Exchange adsorption of 3 amino 1-2-4 triazole by an organic soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33,** 524-528.

ORLOV D. S., PIVOVAROVA I. A., GORBUNOV N. I., 1973. Interaction of humic substances with minerals and the nature of their bonds, a review. *Sov. Soil Sci.* **5,** 568-581.

PHILEN O. D., WEED S. B., WEBER J. B., 1970. Estimation of surface charge density of mica and vermiculite by competitive adsorption of diquat 2^+, paraquat 2^+. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **34** (3), 527-531.

RUSSEL J. D., CRUZ M. I., WHITE J. L., 1968*a*. The adsorption of 3-aminotriazole by montmorillonite. *J. Agr. Food Chem.* **16** (1), 21-24.

SALTZMAN S., YARIV S., 1976. Infrared and X-ray study of parathion montmorillonite sorption complexes. *Soil Sci. Soc. Amer J.* **40,** 34-38.

SAVAGE K. E., WAUCHOPE R. D., 1974. Fluometuron adsorption desorption equilibrium in soil. *Weed Sci.* **22** (2), 106-110.

SCHNITZER M., KHAN S. U., 1972. *Humic substances in the environment.* Marcel Dekker Inc New York.

SETHI R. K., CHOPRA S. L., 1975. Adsorption degradation and leaching of alachlor in some soils. *J. indian Soc. Soil Sci.* **23** (2), 184-194.

SMELT J. M., LEISTRA M., 1974. Conversion of metam sodium to methylisothiocyanate and basic data on the behavior of methyl-isothiocyanate in soil. *Pesticide Sci.* **5,** 401-407.

SMITH L. W., BAYER D. E., 1967. Soil adsorption of diuron as influenced by surfactants. *Soil Sci.* **103** (5), 328-330.

SPENCER W. F., CLIRTH M. M., FARMER W. J., 1969. Vapor density of soil-applied dieldrin as related to soil-water content, temperature and dieldrin concentration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33,** 509-511.

SWOBODA A. R., THOMAS G. W., 1968. Movement of parathion in soil columns. *J. Agr. Food Chem.* **16** (6), 923-927.

TALBERT R. E., FLETCHALL H., 1965. The adsorption of some s-triazine in soils. *Weeds* **13** (1), 46-52.

TERCÉ M., CALVET R., 1975. Role of aluminum in the adsorption of atrazine by clay minerals. *Proceedings of the Israel-France Symposium. Behaviour of pesticides in soil.*

TERCÉ M., CALVET R., 1977. Some observations on the role of Al and Fe and their hydroxides in the adsorption of herbicides by montmorillonite. *Sonderdruck aus Zeischrift Für Pflanzen-Krankheiten und Pflanzens-Krankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft VIII* Stuttgart-Hohenheim.

TURNER D. J., 1974. Herbicides additives. *Chem. ind.* **15,** 606-609.

VALLET M., CALVET R., CHAUSSIDON J., 1973. Remarques complémentaires sur quelques aspects physico-chimiques de l'adsorption de l'atrazine par les montmorillonites. *Proc. Eur. Weed Res. Coun. Symp. Herbicides-soils.*

VAN BLADEL R., 1971. Physico-chemical study of the adsorption of organic pesticides by clay minerals. *Ann. Gembloux* **77** (3), 183-194.

VAN BLADEL R., MOREALE A., 1974. Adsorption of fenuron and monuron (substituted ureas) by two montmorillonite clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38,** 244-249.

VAN OLPHEN H., 1963. *An introduction to clay colloïd chemistry.* Interscience New York, 318 p.

WADA K., HARWARD M. E., 1974. Amorphous clay constituents of soils. *Adv. Agron.* **26,** 211-254.

WARD T. M., HOLLY K., 1966. The sorption of s-triazines by model nucleophiles as related to their partitioning between water and cyclohexane. *J. colloïd interface sciences* **22,** 221-230.

WATSON J. R., POSNER A. M., QUIRK J. P., 1973. Adsorption by the herbicide 2,4-D on goethite. *J. Soil Sci.* **24** (4), 503-511.

WEBER J. B., 1966. Molecular structure and pH effects on the adsorption of 13 s-triazine compounds on montmorillonite clay. *Amer. Mineralogist* **51,** 1657-1670.

WEBER J. B., 1967. Spectrophotometrically determined ionisation constants of 13 alkilamino s-triazines and the relationships of molecular structure and basicity. *Spectrochimica Acta* **23,** A, 458-461.

WEBER J. B., 1970. Adsorption of s-triazines by montmorillonite as a function of pH and molecular structure. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **34** (3),

WEBER J. B., 1972. Cited in Kearney P. C. et Kaufman D. D. *Chemistry degradation and mode of action.* Dekker M. Inc New York and Basel.

WEBER J. B., PERRY P. W., UPCHURCH R. P., 1965. The influence of temperature and time on the adsorption of paraquat, diquat, 2, 4-D and prometone by clays, charcoal and an anion-exchange resin. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **29,** 678-688.

WEBER J. B., WEED S. B., 1968. Adsorption and desorption of diquat, paraquat and prometone by montmorillonite and kaolinite clay minerals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **32,** 485-487.

WEBER, J. B., WEED S. B., WARD T. H., 1969. Adsorption of s-triazines by soil organic matter. *Weed Sci.* **17,** 417-421.

YAMANE V. K., GREEN R. E., 1972. Adsorption of ametryne and atrazine on an oxisol montmorillonite and charcoal in relation to pH and solubility effects. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **36** (1), 58-64.

YARON B., SALTZMAN S., 1972. Influence of water and temperature on adsorption of parathion by soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **36,** (4), 583-586.

Ann. agron., 1980, **31** (2), 163-189.

Un modèle d'action des techniques culturales sur le blé
II. — Essai de typologie des principaux départements producteurs de blé

Martine OLLIVIER

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

On démontre que l'élaboration d'un modèle agrométéorologique de prévision de rendements (du blé) à l'échelle nationale passe par la mise au point préalable de modèles régionaux.

On propose ici une méthode de régionalisation objective des vingt-six principaux départements français producteurs de blé, fondée sur les facteurs agrotechniques dont l'importance dans l'élaboration du rendement a été démontrée dans un article précédent. Elle met en œuvre l'analyse factorielle des correspondances ; les critères retenus pour regrouper les départements en régions sont (i) l'identité du système de culture (appréhendé par l'assolement) (ii) l'homogénéité d'évolution de la fumure.

Ces critères s'avèrent redondants puisque dans les quatre principales régions définies, chaque type d'assolement est caractérisé par un type d'évolution de la fumure. La régionalisation trouvée est très cohérente avec ce que l'on connaît de la géographie agricole de la France. Ses principales limites résident dans la qualité des données disponibles.

Introduction

Les rendements des cultures sont sous la dépendance à la fois des facteurs climatiques et agrotechniques. La plupart des modèles agrométéorologiques portent uniquement sur des séries chronologiques : la prise en compte de la tendance à l'augmentation des rendements, se fait par une *description* plus ou moins précise de leur évolution au moyen d'une fonction du temps. Or, la nécessité d'expliciter les facteurs culturaux et techniques, véritables moteurs de cette évolution, a été clairement établie : Baier (1977) cite les travaux de Coffing qui, dans son modèle « blé » pour la Turquie, introduit une variable « fumure » aux côtés de variables climatiques ; Nelson et Dale (1978), dans un modèle « maïs » pour la Grande Plaine Américaine, montrent que la substitution de la variable « fumure azotée » à la variable temps améliore sensiblement la qualité du modèle. Nous avons mis en évidence (Ollivier et Malet, 1979) sur une variété de blé cultivée dans une station expérimentale, le rôle du précédent cultural, puis établi le principe d'un modèle intégrant l'action de la fumure et du précédent cultural : il s'est révélé nettement supérieur au simple ajustement linéaire de la tendance temporelle des rendements.

L'extension d'un tel modèle à l'échelle nationale est évidemment la deuxième étape à franchir. Dans l'état actuel des connaissances analytiques sur l'élaboration du rendement du blé ce modèle ne peut être que statistique. Or, pour avoir un ajustement stable et dont la variabilité d'interaction entre les facteurs sera faible, il est important de découper la gamme de variation des facteurs qui interviendront dans le futur modèle en intervalles réduits pour lesquels la réponse de la plante est plus facile à modéliser (Malet, 1978 ; Ollivier et Malet, 1979). La régionalisation des facteurs apparaît donc comme une condition nécessaire à la fiabilité des futurs modèles.

De façon plus générale, régionaliser c'est aussi fixer un certain nombre de paramètres pédologiques, techniques et socio-économiques difficilement accessibles et quantifiables, qui s'expriment à travers une « potentialité régionale ». Les distributions de ces divers facteurs et leurs liaisons sont spécifiques d'une région donnée (dans chaque région, on cultive de préférence certaines variétés, on y pratique certaines techniques culturales...). Pour tenir compte de tous ces facteurs implicites un modèle de prévision a donc tout intérêt à être régional.

En outre, pour fournir une estimation du rendement à une date antérieure à la récolte, un modèle de prévision doit obligatoirement faire des hypothèses sur la séquence climatique « à venir » jusqu'à la récolte ; or, la probabilité que ces hypothèses se réalisent dépend nécessairement du climat de la région concernée : pour cette raison aussi, un modèle de prévision des rendements doit être régional.

Quelques auteurs ont ressenti aussi cette nécessité, sans la formaliser : c'est le cas de Williams *et al.* (1975) qui, établissant un modèle de prévision du rendement des céréales pour quarante-deux districts de la Prairie Canadienne, rangent ceux-ci en trois zones d'après le type de sol. Ils établissent pour chacune un modèle basé sur une série de 12 ans qui donne pour les districts de chaque zone des estimations de rendements plus précises que le modèle global.

Pitter (1977), établissant un modèle pour l'Oregon à partir des données des cinq districts qui le composent sur une série de 33 ans, caractérise chacune des unités de production par un terme constant quantifiant le potentiel moyen du district (défini par l'ordonnée à l'origine de la droite de régression des rendements en fonction du temps) et des variables discrètes décrivant l'évolution des rendements au cours du temps.

D'autres auteurs (Brochet *et al.*, 1977, inter alia), élaborent un modèle à l'échelle nationale en sélectionnant un petit nombre d'unités régionales de façon qu'une combinaison linéaire de leurs rendements soit représentative de la production nationale : il leur suffit alors d'établir un modèle pour chacune d'elles. Malheureusement, ces combinaisons linéaires sont relativement instables car les évolutions dans le temps des différentes unités ne sont évidemment pas analogues. Par contre une régionalisation qui essaiera (entre autres contraintes) de regrouper des départements présentant une évolution semblable, garantira une certaine stabilité des modèles.

La régionalisation que nous présentons ci-après n'est pas fondée comme chez Williams *et al.* ou Pitter sur des critères extérieurs (type de sol ou district de production). Elle découle d'une analyse objective sur certains facteurs du futur modèle. Nous avons choisi les facteurs agrotechniques disponibles qui décrivent au mieux le système cultural : l'assolement et les niveaux de fumure. Il aurait été intéressant de prendre en compte également certaines caractéristiques des sols. Mais il aurait fallu disposer pour chaque département de données analogues à celles des assolements (répartition

de la superficie du département en différents types de sols) qui n'était pas possible directement.

Le choix des facteurs agrotechniques a différentes justifications :

(i) Les facteurs « fumure » et « précédent cultural » sont déterminants au niveau d'une station expérimentale (Ollivier et Malet, 1979).

Nul doute qu'au niveau départemental, la fumure et l'assolement ne le soient également. Toutefois, si l'assolement est une image de la rotation, il n'est représentatif du précédent cultural que si l'on admet que l'ordre de succession des cultures est le même dans les départements de même assolement : c'est vraisemblable puisque la rotation obéit à une « logique » technico-économique.

(ii) Ils sont plus facile à manier que les facteurs climatiques, car moins nombreux.

(iii) En outre, leur variation interannuelle est moins aléatoire dans la mesure où elle suit une évolution raisonnée.

(iv) Enfin, ils sont très liés au climat moyen d'une région (l'assolement en particulier, mais aussi la fumure par sa liaison avec celui-ci) : en réduisant les intervalles de variation des facteurs agrotechniques, on réduit ceux des facteurs climatiques qui sont concomitants.

En fait, en fondant la régionalisation sur la notion de « système cultural » qui, pour une région donnée, est la résultante de tous les facteurs pédologique, climatique, ..., on réduit l'intervalle de variation de tous ces facteurs.

1. — Matériel et méthodes

1.1. — *Données brutes*

Notre objectif nécessite d'avoir des informations issues des principales zones françaises de production de blé, en nombre suffisant pour assurer la représentativité de la prodution nationale. Nous avons utilisé comme source la Statistique Agricole Annuelle établie par le Service Central d'Enquêtes et Etudes Statistiques (S.C.E.E.S.) du Ministère de l'Agriculture dont l'unité de « comptabilité » est le *département*. Cela est regrettable dans un propos tel que le nôtre puisqu'un département ne représente généralement pas une entité agricole, et que d'autre part, le nombre de points examinés reste réduit — ce qui n'est pas sans importance lorsqu'on aborde une démarche de type statistique.

Les statistiques concernant les engrais N.P.K. proviennent des industriels des engrais. Il s'agit des quantités de produits purs livrées aux distributeurs en culture (coopératives, négociants) qui sont donc sensiblement différentes des quantités véritablement consommées et *a fortiori* des quantités apportées aux seules cultures de blé. Il en résulte d'une part, un moindre pouvoir explicatif de ces variables fumures sur le rendement du blé : cela n'est pas vraiment gênant par rapport à notre objectif immédiat de typologie des départements car on peut considérer la consommation d'engrais comme un indice de technicité du département. D'autre part, comme la consommation d'engrais est en grande partie déterminée par la nature des cultures pratiquées, il y a une liaison évidente entre nos variables « fumure » et « assolement ».

Les données de répartition des terres labourables en différentes cultures qui permettent de décrire un assolement (exprimées en p. 100) sont issues d'une enquête annuelle par sondage et à couverture nationale sur l'utilisation du territoire. Les classes de cultures sont : céréales (blé, orge, avoine, maïs, ...) plantes sarclées (pomme de terre, betteraves industrielles, betteraves fourragères, choux fourragers, ..., etc) (1), plantes textiles, oléagineux, cultures industrielles diverses (houblon, tabac), plantes médicinales et à parfum, légumes secs de plein champ, cultures légumières de plein champ, cultures florales de plein champ, cultures fourragères (prairies artificielles et temporaires, fourrages annuels), semences, jachère. La répartition des cultures en p. 100 des terres labourables ne permet évidemment pas de tenir compte des fluctuations possibles de la superficie des terres labourables (variations au profit ou aux dépens de la Surface Toujours en Herbe).

L'étude porte sur les vingt-six principaux départements producteurs de blé (fig. 1) dont la contribution à la production nationale est d'environ 60 p. 100, pour lesquels on dispose d'une série de données de 14 ans (1962-1975). Les années 1976 et 1977 serviront à tester la stabilité des analyses. Bien entendu, deux années seulement sont

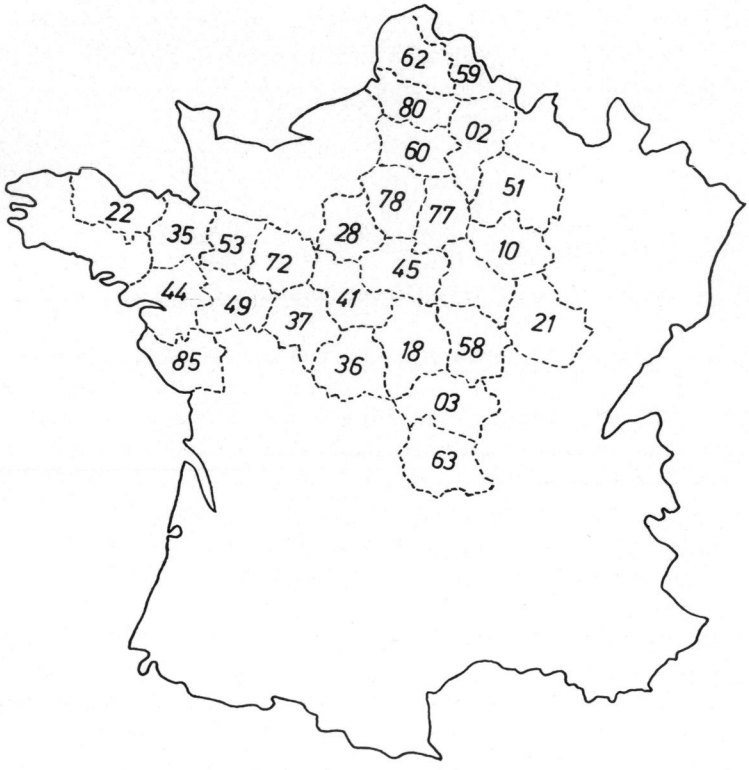


FIG. 1. — *Les vingt-six départements étudiés.*
The twenty-six studied departments.

(1) On remarquera l'inconvénient que présente une telle classification pour caractériser un assolement. Elle regroupe en effet sous la même étiquette des cultures souvent incompatibles dans un même assolement (c'est le cas du blé et du maïs dans la classe « céréales ») ou qui caractérisent des systèmes culturaux très différents (c'est le cas des betteraves fourragères et des betteraves industrielles dans la classe « plantes sarclées »).

insuffisantes pour faire ce test, mais compte tenu de la série disponible, on ne peut y consacrer davantage d'années. Pour ce qui concerne le département de la Seine-et-Oise (78), il est composé à partir de 1969 de la réunion des trois départements Yvelines (78), Essone (91), Val d'Oise (94).

1.2. — *Méthode de régionalisation*

1.21. *Choix de la technique d'analyse.*

Notre problème revient à décrire au mieux les proximités entre des départements caractérisés par un ensemble de variables de manière à les grouper en familles homogènes. Il relève donc de l'analyse de données qui recouvre en fait deux ensembles de techniques : l'analyse factorielle et la classification automatique (Pages *et al.*, 1979). Cette dernière est caractérisée par le choix d'un indice de proximité (ou distance) et d'un algorithme d'agrégation qui conduisent à un arbre de classification. En fait, le résultat dépend en grande partie de la méthode adoptée (Cailliez et Pages, 1976).

Or la classification recherchée a pour objectif l'élaboration d'un modèle dont on ne connaît ni la forme ni le poids relatif des différentes variables. Il est donc impossible de choisir *a priori* un indice de proximité et un mode d'agrégation.

On est donc conduit aux techniques d'analyse factorielle ; le choix de l'une d'entre elles, l'analyse des correspondances, est guidé par la présence de certaines variables dans l'assolement dont les distributions ne sont pas gaussiennes. En outre, l'une des propriétés intéressantes de cette méthode est de proposer une meilleure représentation simultanée des variables et des individus (Lebart *et al.*, 1977). On n'est cependant pas dans un cas d'application directe de l'analyse des correspondances puisque le tableau des données est hétérogène : à côté de grandeurs d'assolement sans dimension exprimées en p. 100 (p. 100 céréales, p. 100 sarclées...) on trouve des grandeurs exprimées en tonnes. Il est donc nécessaire d'exprimer les données de fumure en *niveaux relatifs* par rapport à une norme.

1.22. *Transformation des variables de fumure.*

Il est important pour faire celle-ci de rappeler les objectifs de la régionalisation :

(i) Réduire les intervalles de variation des facteurs. Or, la variabilité des niveaux de fumure présente deux composantes :

— une variabilité dans l'espace qui, par la nature même des données est très liée à la variabilité de l'assolement : par conséquent, les niveaux de fumure sont déjà pris en compte partiellement par le type d'assolement,

— une variabilité dans le temps : cette deuxième composante est parfaitement décrite si l'on considère non plus les niveaux *absolus* mais les niveaux *relatifs* de fumure.

En bilan, le passage à des niveaux relatifs ne s'accompagne pas de perte notoire d'information sur la variabilité de la fumure.

(ii) Assurer une certaine qualité prédictive aux futurs modèles régionaux en imposant comme critère de régionalisation une homogénéité d'évolution dans le

temps des départements, particulièrement pour le facteur qui évolue le plus : la fumure. La transformation des variables fumure doit donc permettre la comparaison des évolutions relatives des différents départements.

On a donc été amené à choisir comme norme la valeur maximale atteinte par le département pendant la période 1962-1975. Les nouvelles variables fumure sont donc :

$$\frac{N_{ij}}{N_{max\,j}}, \quad \frac{P_{ij}}{P_{max\,j}}, \quad \frac{K_{ij}}{K_{max\,j}}$$

où N_{ij}, P_{ij}, K_{ij} sont les consommations du département j pour l'année i, en azote, phosphore, potassium et $N_{max\,j}$, $P_{max\,j}$, $K_{max\,j}$, sont les maximums atteints par le département j au cours de la période 1962-1975. Pour simplifier l'écriture on notera ces variables N/N_{max}, P/P_{max}, K/K_{max}.

Ces variables fumure sont exprimées en pourcentages. On a ainsi rendu homogène le tableau de données, et fondé la discrimination des départements sur les vitesses d'évolution de la fumure dans le temps.

1.23. *Conduite de l'analyse.*

Pour matérialiser un gradient dans l'évolution de la fumure, on associe à chacune des variables créées sa variable complémentaire : $(1 - N/N_{max})$, $(1 - P/P_{max})$, $(1 - K/K_{max})$. Cela présente en outre l'avantage de donner le même poids à chaque catégorie de variable (assolement, azote, phosphore, potassium), puisque dans tous les cas, la somme des variables qui les définissent vaut 1. En effet, la variable assolement comporte au départ douze modalités (on est amené à en supprimer par la suite) dont la somme vaut 1 (100 p. 100), la variable azote en comporte 2 (N/N_{max} et $1 - N/N_{max}$) dont la somme vaut 1 de même que les variables phosphore et potassium (cf. tabl. 1).

TABLEAU 1

Tableau des données soumis à l'analyse
Analysed table of data

Variable Observation	Assolement				Azote			Phosphore			Potassium			
	a	b	...	Σ	c	d	Σ	e	f	Σ	g	h	Σ	Σ total
Département 1.....	0,1	0,2	. .	1	0,7	0,3	1	0,6	0,4	1	0,8	0,2	1	4
Département 2.....	. .	. .	. .	1	. .	. .	1	. .	. .	1	. .	. .	1	4
.....														
Département 26....	. .	. .	. .	1	. .	. .	1	. .	. .	1	. .	. .	1	4

Les modalités des variables sont représentées par des lettres :
a : p. 100 céréales ; c : N/N_{max} ; e : P/P_{max} ; g : K/K_{max} ;
b : p. 100 sarclées ; d : $1 - N/N_{max}$; f : $1 - P/P_{max}$; h : $1 - K/K_{max}$.
...etc...

Les chiffres indiqués dans le tableau sont purement illustratifs. La colonne Σ représente la somme des modalités de la variable considérée.

Letters a, b, c, d, e, f, g, h ... represent the different modalities of variables. Numbers in the table are illustrative ones. The Σ column represents the sum of modalities of the corresponding variable.

De ce fait aussi, quelle que soit l'année, la somme des variables pour chaque département vaut 4.

Notre démarche consistera à essayer de déceler, à partir de l'analyse générale (sur l'ensemble des départements) des groupes de départements, si possible contigus, dont le comportement, vis-à-vis de l'évolution des techniques culturales (au sens réduit de assolement + fumure) est homogène. Pour cela, la projection simultanée des individus et des variables sur les différents plans factoriels est un support d'analyse très important. Ensuite nous essayerons d'affiner le découpage en réitérant l'analyse sur les groupes mis en évidence. Notre critère permanent sera que le découpage final demeure cohérent d'un point de vue agronomique et que les groupes définis soient composés d'au moins deux et de préférence trois départements pour assurer un nombre suffisant de répétitions (c'est-à-dire de degrés de liberté pour le modèle ultérieur). Nous essayerons également d'étudier la stabilité des comportements des groupes au cours du temps en réitérant l'analyse sur des sous-périodes, le cas échéant.

Au cours de l'étude, nous allons être amenés à modifier le groupe des variables en supprimant par exemple dans l'assolement les cultures qui ont un caractère très marginal ou totalement indépendant (dans ce cas une variable crée à elle seule un axe). Pour que les individus gardent cependant toujours un poids identique, nous introduirons alors les complémentaires des modalités restantes. Il est évident qu'alors, la somme marginale des variables qui caractérisent un individu ne vaut plus 4 : si l'on a cinq modalités d'assolement et qu'on introduit leurs complémentaires à côté d'une variable fumure (N) à deux modalités, la somme vaudra 6, avec un poids plus important pour l'assolement (5) que pour la fumure (1) : cela n'est pas gênant dans la mesure où cela pondère le fait que la variabilité de la fumure pour une région donnée et pendant la période considérée est beaucoup plus grande que celle de l'assolement.

Pour simplifier le langage nous conviendrons dans la suite d'appeler indifféremment « variable » les différentes modalités *céréales*, *sarclées*, etc..., N/N_{max}, P/P_{max}, K/K_{max}, et « variable complémentaire » leurs modalités complémentaires (1 — *céréales*, 1 — *sarclées*, ..., 1 — N/N_{max}, 1 — P/P_{max}, 1 — K/K_{max}).

Nous noterons ($\otimes$) les variables complémentaires (ex. : 1 — *céréale* sera noté (*céréales*)). Nous noterons (1, 2) le plan factoriel défini par les axes 1 et 2, (1, 3) celui défini par les axes 1 et 3... L'analyse détermine plusieurs axes factoriels : nous n'interprèterons que ceux qui ont un pourcentage « intéressant » de variance expliquée (ce pourcentage est porté sur les graphiques). Sur les graphiques représentant la projection des individus et des variables dans les plans factoriels, nous avons réuni toutes les répétitions (années) d'un même département. Lorsqu'elle n'est pas évidente (fig. 8*b*), nous avons noté par une flèche l'évolution des points représentatifs du département au cours du temps.

2. — Résultats

2.1. — *Analyse générale*

Elle porte sur quatorze variables dont huit d'assolement (on a éliminé légumes secs, cultures légumières, cultures florales, plantes médicinales dont le poids est négligeable), trois variables de fumure et leurs complémentaires. Le premier axe

(fig. 2) est essentiellement déterminé par les variables de fumure : aux fortes valeurs de cet axe correspondent les rapports N/N_{max}, P/P_{max}, K/K_{max} élevés (proches de 1) c'est-à-dire les années — départements où la fumure est proche du maximum ; aux valeurs faibles de l'axe correspondent des rapports faibles donc les années — départements où la fumure est loin du maximum. Le deuxième axe est déterminé par les deux têtes d'assolement *céréales* (pour les valeurs positives) et *fourrages* (pour les valeurs négatives). Les *cultures légumières*, *semences* et *oléagineux* qui se projettent près des *céréales* vers les valeurs positives de l'axe 2 ont en fait une inertie faible (c'est-à-dire qu'elles ont peu de poids dans la détermination de l'axe) : on a donc été conduit à les éliminer et ne conserver que la variable *céréales*.

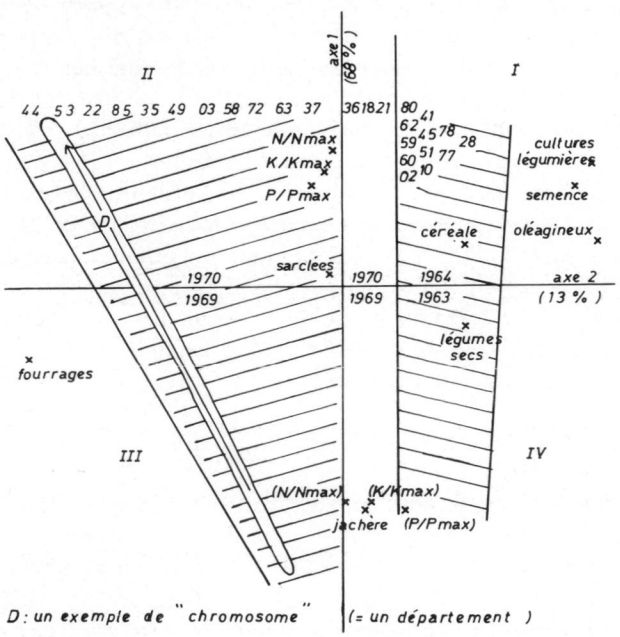


FIG. 2. — *Analyse générale* (vingt-six départements, période 1962-1975) : *plan factoriel* (1,2) (81 p. 100 de variance expliquée). Pour simplifier, on n'a pas noté tous les points représentatifs d'un département qui s'organisent en « chromosomes » grossièrement parallèles à l'axe 1 ; on a seulement schématisé les trois domaines dans lesquels ils se répartissent en indiquant pour chacun la date à laquelle les « chromosomes » franchissent l'axe 2. Les x sont les projections des variables. Celles notées entre parenthèses (⊗) sont les variables complémentaires (ex. : $(N/N_{max}) = 1 - N/N_{max}$).

General analysis (twenty-six departments, 1962-1972 period). *Factorial plan* (1-2) (81 p. 100 of the variance is explained). As a simplification, the chromosome-like shapes, grouping the representative dots of each department, which are roughly parallel to axis 1 have not been represented. The three areas into which they part, according to the date at which the chromosomes cross axis 2, have only been schematized. The x are the projected variables. The complementary variables are noted between parentheses (⊗) : e. g. $(N/N_{max} = 1 - N/N_{max})$.

Si l'on considère la projection des points et des variables dans le plan factoriel (1, 2) on constate que :

— les années d'un même département s'individualisent assez nettement en un « chromosome » allongé, grossièrement parallèle à l'axe 1 ; elles sont rangées chronologiquement dans l'ordre des fumures croissantes ;

— les différents départements s'organisent dans des groupes plus ou moins bien délimités qui s'étagent le long de l'axe 2 :

- un premier groupe, vers les valeurs positives, est composé des départements 28, 77, 78, 41, 45, 51, 59, 60, 80, 10, 62, 02, 21, 18, 36,
- un second groupe, vers les valeurs négatives, est composé des départements 44, 53, 22, 85, 35, 49, 03, 58, 72, 63, 37. Les cinq derniers cités assurent la transition avec le groupe précédent.

Les quadrants III et IV concentrent les premières années de la série autour des valeurs nulles de l'axe 2 tandis que les années récentes figurent dans les quadrants I et II où le nuage des points s'étire le long de l'axe 2. Tout se passe comme si, d'une situation indifférenciée durant les années 60, on était passé à une spécialisation régionale les dernières années. Chacun des deux axes renferme donc une partie de la tendance temporelle : l'axe 1, l'intensification de la fumure, l'axe 2 la spécialisation des cultures. Toutefois, pour un département donné, l'évolution de la fumure est beaucoup plus importante que celle de l'assolement : cela explique la différence d'inertie entre les deux axes (68 p. 100 pour le premier, c'est-à-dire la fumure, 13 p. 100 pour le second, c'est-à-dire l'assolement).

La coupure dans le temps déterminée par l'origine de l'axe 1 (fig. 2) a lieu vers 1969-1970 pour les départements du 2e groupe et les départements 36, 18, 21 du 1er groupe, vers 1969-1968 ou même 1963-1964 pour les autres départements. En d'autres termes, l'effort d'intensification de la fumure a été plus tardif pour le deuxième groupe que pour le premier.

On le vérifie en comparant les histogrammes de fréquence et les courbes d'évolution en fonction du temps du rapport N/N_{max} établis pour les deux groupes (fig. 3) :

— pour le premier groupe, que nous appellerons « Nord », la répartition est concentrée dans la plage 0,5-1, ce qui indique pendant la période considérée un stade avancé de l'intensification de la fumure. La vitesse relativement faible de l'évolution dans le temps traduit sans doute un niveau proche de la saturation ;

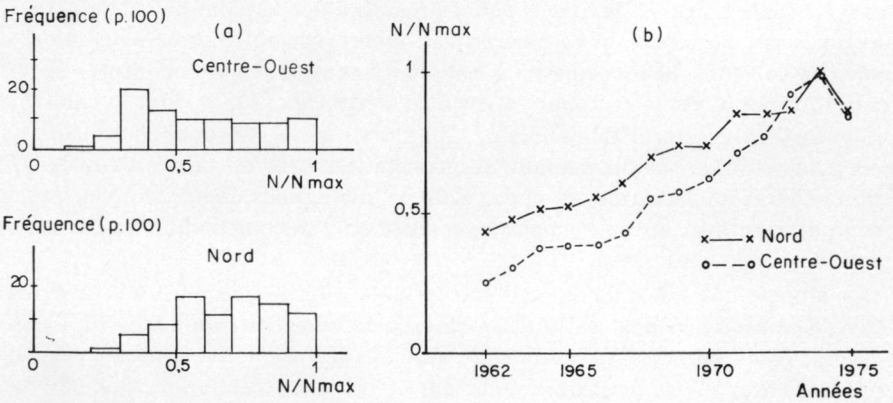


FIG. 3. — *Valeurs des rapports N/N_{max} pour les départements des régions Nord et Centre-Ouest.*
a) Histogrammes de fréquence. *b*) Evolution moyenne dans le temps.
Values of the N/N_{max} ratios for North and Middle-West Regions.
a) Frequencies histograms. *b*) Mean evolution with time.

— pour le deuxième groupe que nous appellerons « Centre-Ouest », la répartition couvre toute la plage 0-1 ; elle est nettement dissymétrique à gauche avec un mode dans la plage 0-0,5, ce qui traduit un démarrage tardif de l'intensification. La vitesse en moyenne plus forte de l'évolution indique une situation encore éloignée de la saturation.

Il est intéressant de savoir si la coupure mise en évidence autour des années 1969-1970 détermine des comportements différents à l'intérieur des groupes de départements déjà constitués. En effet, on aura d'autant plus de chance de trouver des modèles stables qu'ils seront établis sur des périodes homogènes.

Nous sommes donc amenés à envisager une étude fractionnée :

— en deux régions : « Nord » (62, 59, 80, 02, 60, 51, 10, 77, 78, 28, 41, 45) et « Centre-Ouest » (44, 85, 35, 22, 49, 53, 72, 36, 37, 18, 21, 58, 03, 63) ;

— sur la période entière (1962-1975) et sur deux sous-périodes de longueur équivalente : P_1 (1964-1969) et P_2 (1970-1975).

D'un point de vue descriptif les deux sous-périodes sont intéressantes à examiner. Cependant, d'un point de vue prédictif, le comportement des départements pendant les dernières années est le plus important : c'est en effet celui qui a le plus de chances de se retrouver dans les années « à venir ». Nous nous bornerons donc à présenter brièvement les graphiques des analyses relatives à la période 1964-1969.

On peut maintenant énoncer les principes d'interprétation dont l'essentiel est contenu dans les graphiques :

2.11. *Signification des axes.*

— La coordonnée (projection) d'une variable sur les axes factoriels ne renseigne pas nécessairement sur sa contribution absolue à la détermination des axes (c'est-à-dire la part que prend la variable dans la variance expliquée par les axes) puisque celle-ci est égale au carré de la coordonnée pondéré par le poids de la variable. C'est pourquoi il est intéressant de considérer les couples (variable, complémentaire) dont le poids est constant : leurs projections ont alors une signification en termes de contribution absolues. C'est le cas pour la variable *oléagineux* (fig. 4) dont la contribution absolue au 2e axe est très faible (3,5 p. 100) alors que sa coordonnée sur cet axe est élevée : sa variable complémentaire se projette très près du centre de gravité, traduisant une très faible variabilité et par suite, le faible poids de la variable *oléagineux*. La comparaison avec la variable *plantes sarclées* dont la contribution au 2e axe est de 51 p. 100 est très illustrative.

— L'angle que fait la direction d'une variable avec un axe illustre la contribution relative c'est-à-dire la part de la dispersion de la variable expliquée par l'axe, qui est en fait égale au carré du cosinus de l'angle. Ainsi, une variable qui se projette très près d'un axe avec une coordonnée élevée est presqu'entièrement « expliquée » par cet axe. Là encore, il est intéressant de considérer les couples (variable + complément), ces deux points étant alignés avec l'origine : en effet, ils matérialisent des directions de signification connue (gradient de fumure...) qui font avec les axes factoriels des angles faciles à déterminer.

2.12. *Projection des départements* (les années d'un même département sont regroupées de façon à constituer un individu).

La proximité des départements entre eux, leur position relative vis-à-vis de l'ensemble des variables assolement et fumure, leur plus ou moins grand étirement, sont autant de critères qui permettent de les décrire et de les discriminer.

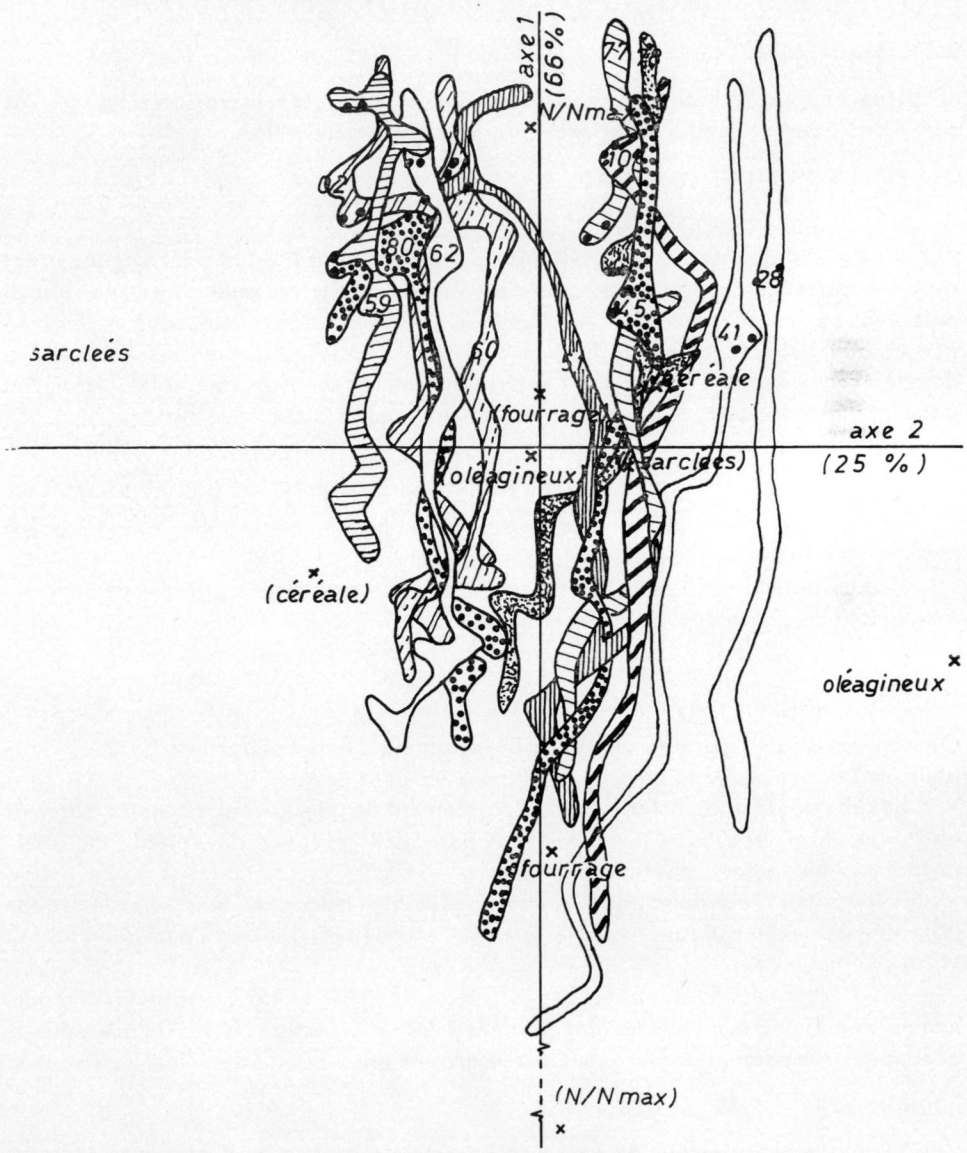


FIG. 4. — *Analyse de la région Nord, période* 1962-1975 : *plan factoriel* (1,2)
(91 p. 100 de la variation totale). On a noté ● les années supplémentaires 1976 et 1977.

Analysis of North Region : 1962-1975 *period factorial plan* (1,2)
(91 p. 100 of the variance is explained). Supplementary years 1976 and 1977 are doted ●.

2.2. — *Analyses régionales*

Nous avons supprimé certaines variables qui ne sont pas indispensables du fait de leur liaison avec d'autres ou de leur faible part dans la détermination des axes. Il reste cinq variables d'assolement (céréales, sarclées, oléagineux, fourrages, jachère) auxquelles on associe leurs variables complémentaires, et le couple N/N_{max}, (N/N_{max}).

2.21. *Région Nord.*

Une analyse préliminaire nous a conduit à supprimer la variable *jachère* car son poids (inertie) sur les deux premiers axes est négligeable.

Période 1962-1975 (fig. 4).

a) *Signification des axes.*

L'axe 1 est déterminé par l'évolution de la fumure et il est corrélé négativement avec l'importance des fourrages dans l'assolement. Cette corrélation est due principalement au fait que parmi les cultures fourragères on trouve beaucoup de légumineuses auxquelles on apporte beaucoup moins d'azote qu'aux autres cultures. Le deuxième axe est déterminé par l'opposition *plantes sarclées* d'un côté, *céréales* et dans une moindre mesure *oléagineux* de l'autre. Indiquons que le 3e axe (avec 6 p. 100 seulement de la variance) caractérise la place des fourrages dans l'assolement.

b) *Projection des départements sur le plan factoriel* (1, 2) (fig. 4) :

Les années, pour un même département, s'étirent le long de l'axe 1 qui est synonyme de gradient de fumure.

L'axe 2 induit une régionalisation : on distingue en effet deux groupes de départements dont les projections sur l'axe 2 sont :

(α) négatives : 2, 62, 80, 60, 59 ;

(β) positives : 41, 45, 77, 78, 10, 28.

On remarquera la position mixte du département 51 qui appartient au 2e groupe pour les 1res années de la série et au 1er pour les dernières.

Le groupe (α) se caractérise par un assolement de type céréales-plantes sarclées alors que le groupe (β) a un assolement purement céréalier où entrent en faible proportion oléagineux et plantes sarclées.

D'autre part, le groupe (β) est beaucoup plus étiré le long de l'axe 1 que le groupe (α), signe d'une intensification plus forte de la fumure (il est d'ailleurs parti d'un niveau N/N_{max} plus bas).

Enfin, la projection des années supplémentaires 1976 et 1977 montre un comportement homogène à l'intérieur des groupes : faible récession de la fumure pour le groupe (α), récession plus marquée pour le groupe (β).

Période 1964-1969 (fig. 5).

Le pourcentage relatif de variance expliquée par les deux premiers axes est modifié. On retrouve les groupes précédents (le département 51 adhère entièrement au groupe (β)). Dès cette époque, le groupe (α) connaît, contrairement au groupe (β), des fumures proches du maximum.

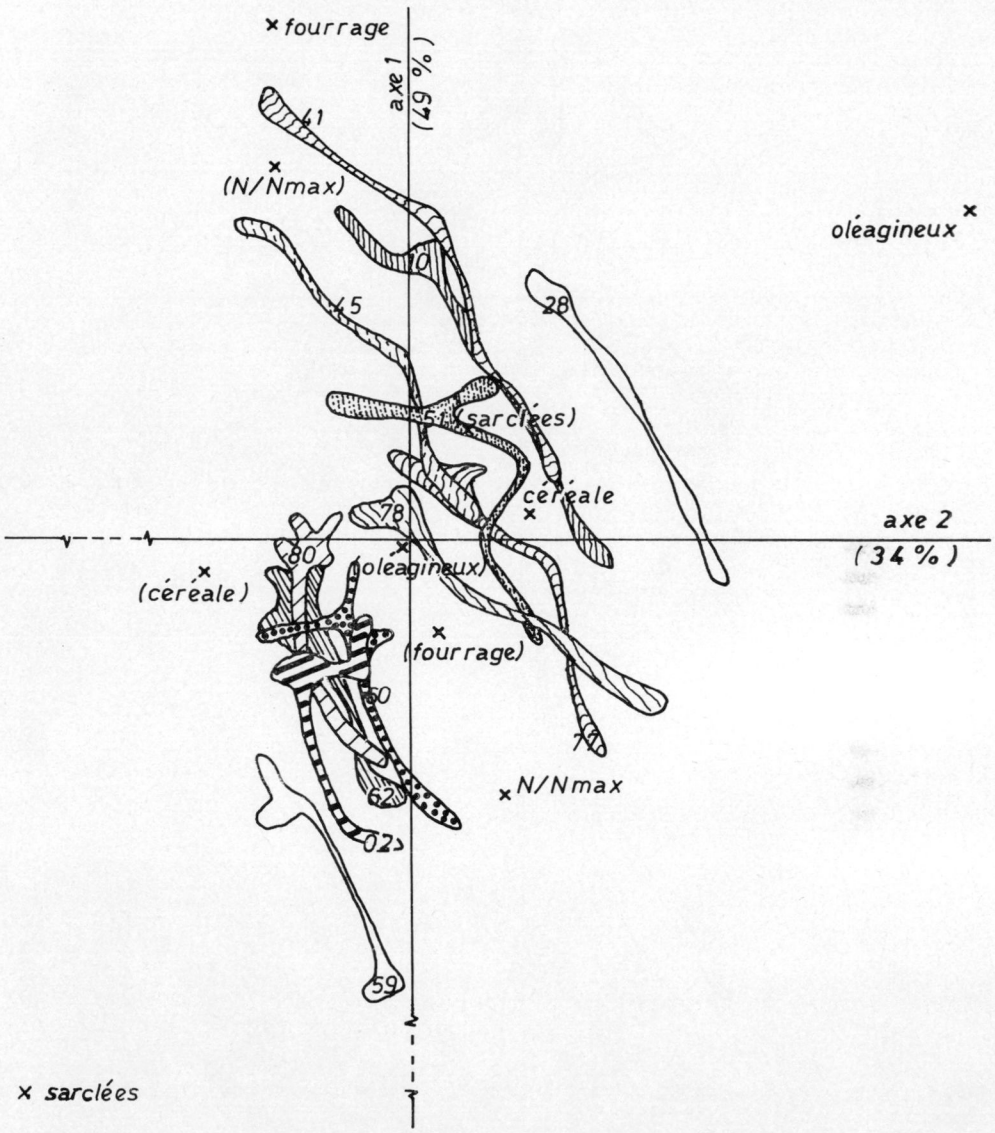


FIG. 5. — *Analyse de la région Nord, période* 1964-1969 : *plan factoriel* (1,2) (83 p. 100 de la variance totale) .

Analysis of North Region : 1964-1969 *period factorial plan* (1,2) (83 p. 100 of the variance is explained).

Période 1970-1975 (fig. 6).

a) *Signification des axes.*

Le premier axe est déterminé par l'opposition *plantes sarclées-céréales*. L'importance de la fumure est ici nettement plus faible que pour la période précédente puisqu'elle est rejetée en partie sur l'axe 2 (fig. 6*a*). L'axe 3 (fig. 6*b*) représente encore la place des fourrages dans l'assolement.

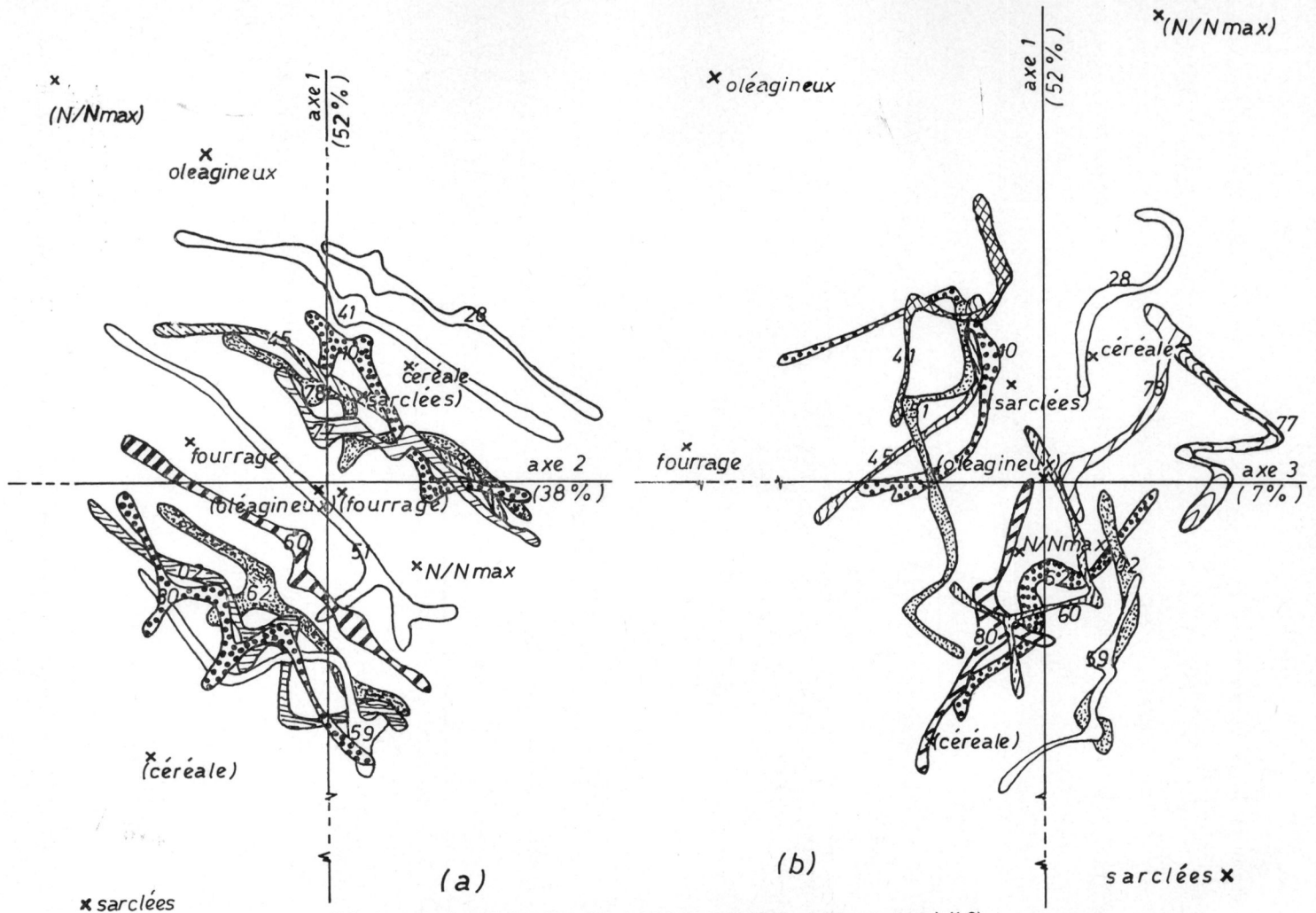


FIG. 6. — *Analyse de la région Nord, période* 1970-1975. *a*) Plan factoriel (1,2) (90 p. 100 de la variance totale). *b*) Plan factoriel (1,3) (59 p. 100 de la variance totale).
Analysis of North Region : 1970-1975 *period. a*) Factorial plan (1,2) (90 p. 100 of the variance is explained). *b*) Factoriel plan (1,3) (50 p. 100 of the variance is explained).

b) *Projection des départements sur les plans factoriels.*

Le plan factoriel (1, 2) (fig. 6*a*) montre un nuage relativement homogène : si l'on fait toujours la distinction entre deux groupes d'assolements le long d'un axe *plantes sarclées-céréales* (matérialisé par la première bissectrice), l'évolution parallèlement à l'axe fumure (deuxième bissectrice) est identique pour tous les départements. Le département 51 se rapproche pendant cette période du groupe (α). Le plan factoriel (1, 3) (fig. 6*b*) fait apparaître une différenciation nette induite par l'axe 3, au sein des deux groupes :

— entre les départements 41, 45, 10 d'une part, 28, 77, 78 d'autre part ;

— à un degré moindre, entre les départements 80, 60, 62 et 59, 02.

Les premiers de ces sous-groupes réservent dans leur assolement une part plus importante aux fourrages que les seconds. Le département 51 est toujours partagé entre les premiers sous-groupes des groupes (α) et (β).

L'étude de la région Nord a donc permis de mettre en évidence deux systèmes de cultures dont l'évolution est différente :

— L'un, composé des départements 28, 77, 78, 41, 45, 10, correspond en gros au Bassin Parisien (Beauce, Brie, Champagne). L'assolement, peu diversifié, est essentiellement céréalier et comporte accessoirement des oléagineux et des cultures fourragères. Ces dernières, selon leur importance, définissent encore deux sous-groupes distincts.

L'intensification de la fumure, déjà avancée au début de la période étudiée s'est poursuivie de manière assez forte durant les années 1964 à 1969.

— L'autre, composé des départements 80, 62, 59, 02, 60, correspond au Nord de la France (Nord, Picardie, Nord de Paris). L'assolement repose sur l'association plantes sarclées-céréales et l'importance des fourrages permet aussi de distinguer deux sous-groupes. Cette région, qui est pour l'essentiel la zone betteravière, a connu une intensification précoce de la fumure, développée pour l'essentiel avant la période étudiée.

— Le département 51, parti d'une situation analogue au premier groupe, a atteint des caractéristiques intermédiaires entre les deux groupes.

2.22. *Région Centre-Ouest.*

Une analyse préliminaire nous a conduit à supprimer la variable *oléagineux*, pour les mêmes raisons qui nous ont conduit à supprimer la variable *jachère* dans l'analyse de la région Nord.

Période 1962-1975 (fig. 7).

a) *Signification des axes.*

Le premier axe représente l'évolution de la fumure. Le deuxième axe est déterminé par l'opposition qui existe dans l'assolement entre *céréales* d'un côté, *plantes sarclées* et *fourrages* de l'autre. Contrairement à ce qui se passe dans la région Nord :

1) Les plantes sarclées sont ici associées aux fourrages : c'est qu'il ne s'agit plus de betteraves industrielles mais de plantes sarclées fourragères (betteraves, choux, ...) logiquement associées aux fourrages.

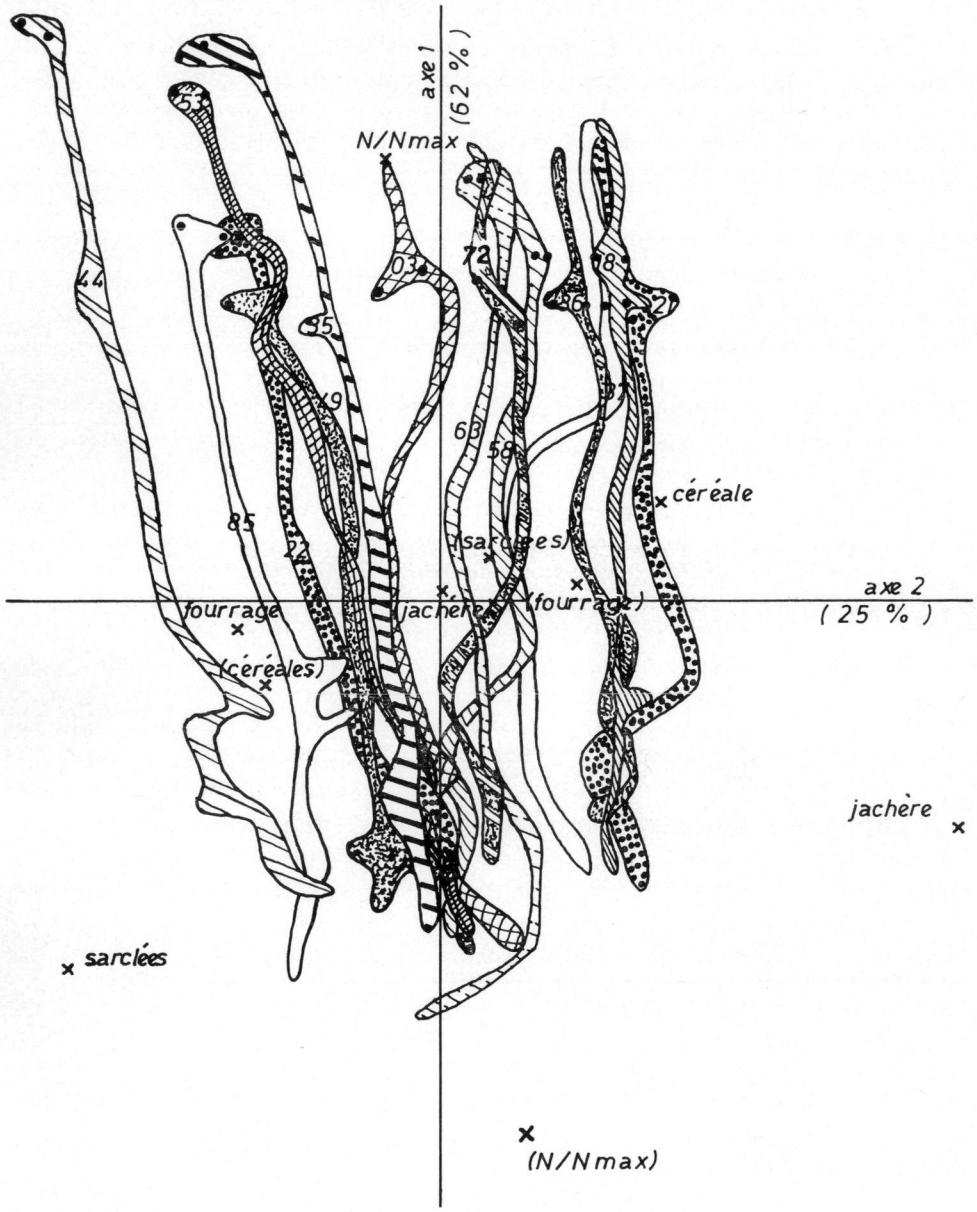


FIG. 7. — *Analyse de la région Centre-Ouest, période* 1962-1975 : *plan factoriel* (1,2) (87 p. 100 de la variance). On a noté ● les années supplémentaires 1976 et 1977.

Analysis of Middle West Region : 1962-1975 *period factorial plan* (1,2) (87 p. 100 of the variance is explained). Supplementary years 1976 and 1977 are doted ●.

2) L'importance des fourrages est indépendante de la fumure (ils forment des axes perpendiculaires), ce qui laisse supposer que les cultures fourragères pratiquées sont également de nature différente.

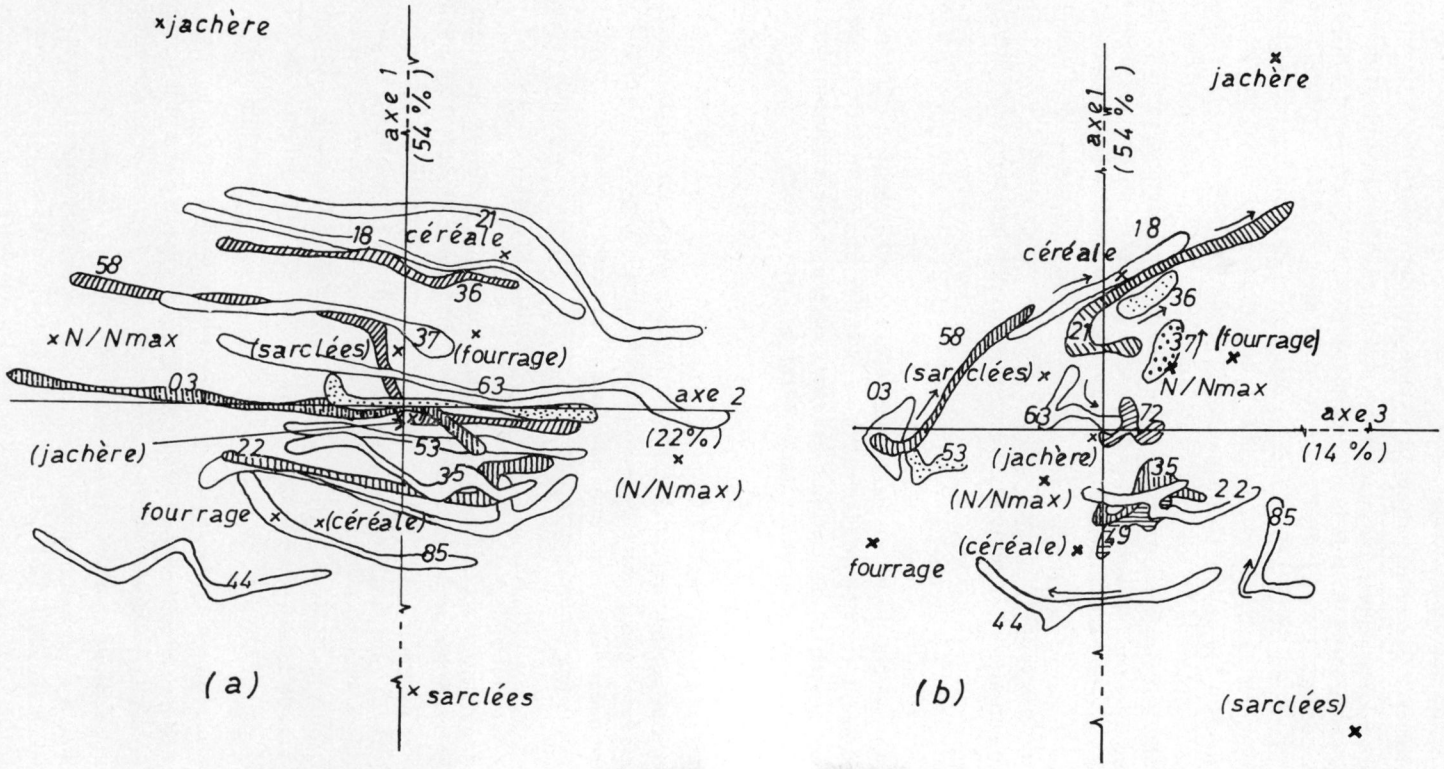


FIG. 8. — *Analyse de la région Centre-Ouest, période* 1964-1969. *a*) Plan factoriel (1,2) (76 p. 100 de la variance totale). *b*) Plan factoriel (1,3) (68 p. 100 de la variance totale).

Analysis of Middle West Region : 1964-1969 *period. a*) Factorial plan (1-2) (76 p. 100 of the variance is explained). *b*) Factorial plan (1-3) (68 p. 100 of the variance is explained).

b) *Projection des départements.*

Le plan factoriel (1, 2) montre la disposition classique des départements en bandes étirées parallèles à l'axe fumure (axe 1). L'étirement est pratiquement le même pour tous les départements, signe qu'ils ont subi une intensification de la fumure semblable au cours de la période. L'axe 2 discrimine un assolement de type céréale-jachère (départements 72, 63, 58, 36, 37, 18, 21), et un assolement de type fourrages-plantes sarclées (départements 22, 35, 53, 49, 44, 85), le département 03 ayant une position mitigée. La projection des années supplémentaires vérifie l'homogénéité à l'intérieur des groupes des comportements vis-à-vis de la fumure en laissant supposer des évolutions différentes pour les deux groupes. La proximité des variables *céréales* (*fourrage*) et *fourrage* (*céréales*) et leur projection proche du centre de gravité montrent que ces cultures caractérisent parfaitement les systèmes culturaux de la région Centre-Ouest, qu'elles sont en outre complémentaires (l'une varie aux dépens de l'autre) et représentées dans des proportions où tous les intermédiaires existent. C'est la raison pour laquelle la coupure entre régions Centre et Ouest était peu nette dans l'analyse générale.

Période 1964-1969 (fig. 8).

Le rôle respectif des deux premiers axes factoriels est inversé par rapport à l'analyse précédente. L'examen du plan factoriel (1, 3) (fig. 8*b*), où le facteur fumure n'a pratiquement pas de poids (puisqu'il est représenté presque exclusivement par l'axe 2), fait apparaître des évolutions particulières de l'assolement.

Période 1970-1975 (fig. 9).

a) *Signification des axes.*

Comme dans la période précédente, l'axe 1 est déterminé par l'opposition *fourrages-plantes sarclées*, l'axe 2 par les variables de fumure. Ce dernier explique une part de variance beaucoup plus grande que dans la période précédente, signe que l'évolution de la fumure est ici plus rapide.

b) *Projection des départements dans le plan factoriel* (1, 2).

On retrouve le long de l'axe 1 les deux grands groupes céréalier et fourrager, le département 03 ayant encore des caractéristiques moyennes (puisqu'il se projette près du centre de gravité). C'est le deuxième groupe qui a maintenant l'intensification de fumure la plus forte alors que c'était le premier pendant la période précédente.

On peut en fait définir des sous-groupes d'assolement plus homogènes en allant du type céréalier vers le fourrager : le groupe 18, 21, 36, 37, le groupe 63, 58, 72, le département 03 puis le groupe 35, 49, 22, 53, 85, et enfin le département 44.

L'étude de la région Centre-Ouest a donc permis de distinguer :

— un groupe à prédominance *céréales* (21, 18, 36, 37) correspondant à la région « Centre » de polyculture-élevage relativement intensive où l'essentiel de l'intensification de la fumure s'est fait pendant la période 1964-1969 ;

— un groupe à prédominance *fourrages* (85, 22, 35, 49, 53) correspondant à la zone « Ouest » d'élevage laitier où l'intensification de la fumure s'est faite tardivement, dans la période 1970-1975. Le département 44 en est le cas extrême ;

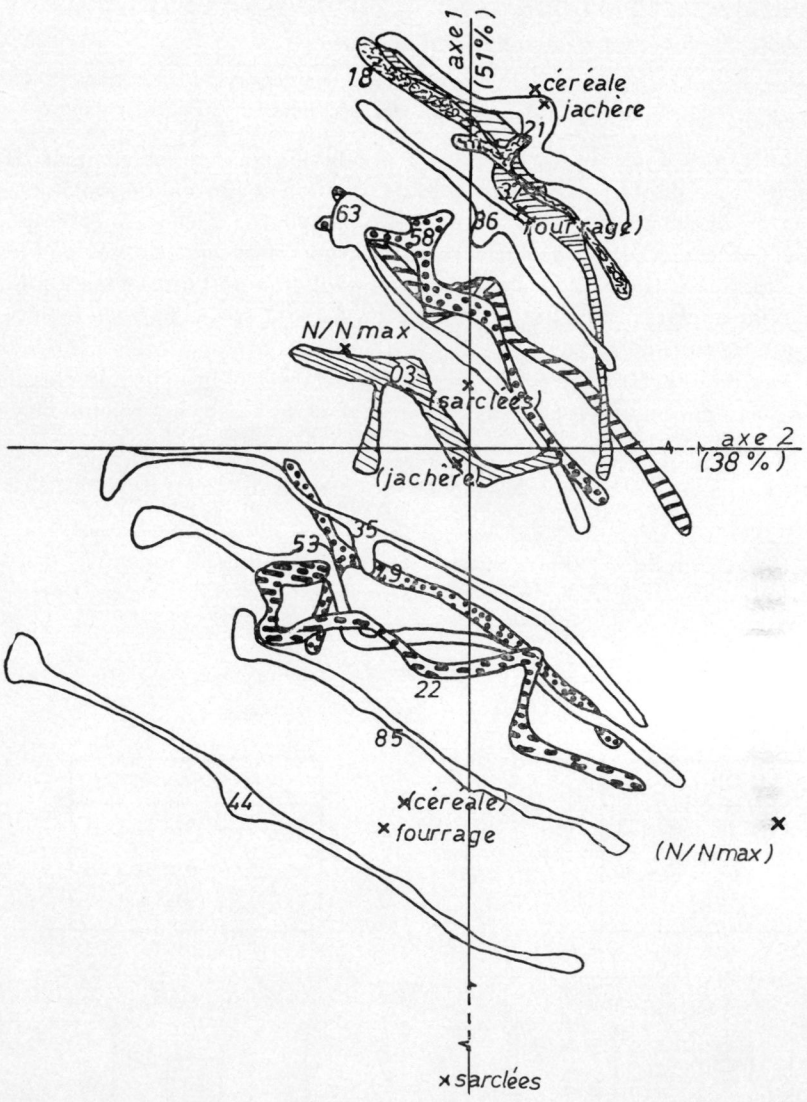


FIG. 9. — *Analyse de la région Centre-Ouest, période* 1970-1974 : *plan factoriel* (1,2) (89 p. 100 de la variance).

Analysis of Middle West Region : 1970-1975 *period, factorial plan* (1-2) (89 p. 100 of the variance is explained).

— un groupe intermédiaire (72, 63, 58) caractérisé aussi par un système de polyculture-élevage moins intensif que le premier, où l'intensification de la fumure a été à peu près constante pendant toute la période étudiée. Le département 03, sans doute à cause de conditions de milieu plus contraignantes, se singularise de ce groupe.

3. — Discussion

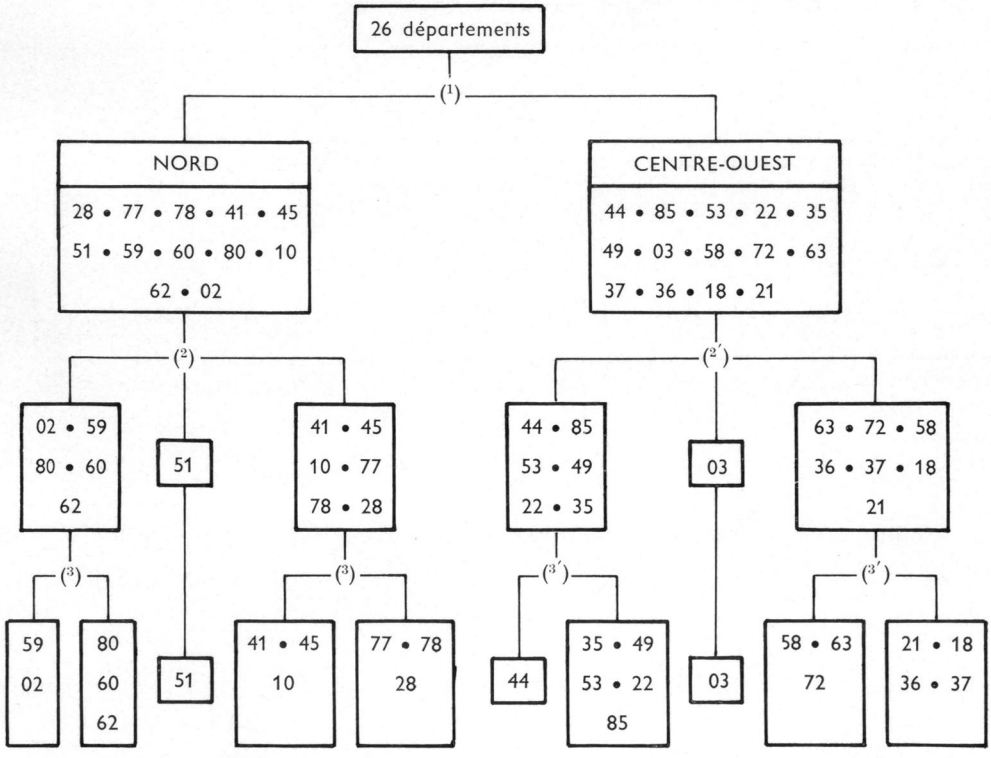
3.1. — *Bilan des résultats*

Les différentes analyses ont permis d'individualiser parmi les vingt-six départements des groupes dont les caractéristiques de situation et d'évolution sont homogènes. On a mis en évidence différents niveaux d'agrégation ; à chacun correspond un facteur ou une combinaison de facteurs de discrimination matérialisés par les axes factoriels (assolement, évolution de la fumure, évolution de l'assolement) qui ont été définis sur les analyses globales ou régionales, portant sur la période entière 1962-1975 ou sur les sous-périodes.

On peut donc présenter les résultats sous la forme d'un arbre de classification (tabl. 2) où ne figurent que les niveaux d'agrégation (« nœuds ») relatifs aux pério-

TABLEAU 2

Les différents « nœuds » de la régionalisation et les critères correspondants
The different steps of regionalisation and corresponding criteria.
Departments are represented by their registration number



(1) Assolement + évolution fumure 1962-1975. Crop rotation + fertilization evolution during 1962-1975.
(2) Assolement + évolution fumure 1962-1975 et 1970-1975.
(2') Assolement 1962-1975. Assolement + évolution fumure 1970-1975.
(3) Assolement 1970-1975.
(3') Assolement + évolution fumure 1970-1975.

des 1962-1975 ou 1970-1975. Trois nœuds apparaissent, dont les deux premiers sont établis sur la période 1962-1975 et le troisième sur la sous-période 1970-1975. Les facteurs responsables des nœuds sont presque toujours une combinaison de l'assolement et de l'évolution de la fumure, l'évolution de l'assolement n'intervenant pas : cela traduit en fait une grande unité de comportement à l'intérieur d'un système cultural donné.

On peut également visualiser la régionalisation obtenue sur une carte (fig. 10) où l'on n'a représenté que les deux premiers niveaux d'agrégation.

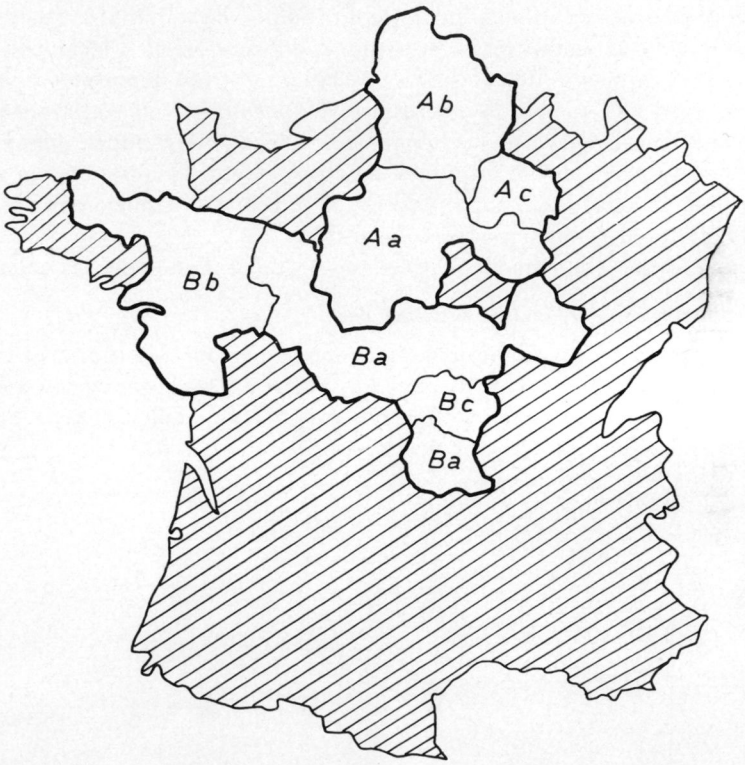


FIG. 10. — *Les différentes régions trouvées et leurs caractéristiques* :

	Assolement	Fumure
A)	Type céréalier	Haut niveau de départ Faible évolution
	a) Céréalier pur	Légère évolution
	b) Céréales-plantes sarclées	Très faible évolution
	c) Caractéristiques intermédiaires	
B)	Type fourrager et polyculture	Faible niveau de départ Forte évolution
	a) Prédominance céréales	Evolution précoce
	b) Prédominance fourrages	Evolution tardive
	c) Caractéristiques intermédiaires	

The different regions obtained.

3.2. — *Critique de la méthode de régionalisation*

Les résultats de notre étude coïncident bien avec les connaissances que l'on a par ailleurs de la géographie agricole de la France. En particulier, les groupes trouvés (à l'exception des départements frontières 58, 63, 72) sont constitués de départements voisins sans que l'on ait imposé de contraintes de contiguïté. Cela est dû bien sûr au facteur assolement dont la répartition dans l'espace correspond bien à une zonation géographique. La suppression des niveaux absolus de fumure n'a absolument pas gêné le respect de la contiguïté. Au contraire, la prise en compte de la variable N/N_{max} et la priorité accordée à la vitesse d'évolution de la fumure ajoute un critère de contiguïté puisque cette vitesse est liée à la diffusion de la « technicité » au sens large qui semble procéder de proche en proche, à partir de départements « pilotes ».

D'autre part une analyse (qui sera incluse dans un travail en préparation) portant exclusivement sur les doses de fumure à l'hectare nous a donné une régionalisation qui coïncide parfaitement avec celle de l'assolement. L'utilisation, sur ce type de données, de méthodes plus sophistiquées intégrant des contraintes de contiguïté (Tallur, 1978) apparaît donc tout à fait superflue.

Il reste à savoir si la méthode utilisée nous a permis d'atteindre les objectifs fixés :

a) *Réduire les intervalles de variation des facteurs* :

Considérons la réponse théorique du blé au facteur fumure (fig. 11) : les niveaux de fumure appliqués au blé dépendent de l'assolement dans lequel il se situe, *a fortiori* les niveaux de fumure dont nous disposons N1, N2, N3, qui sont ceux appliqués à l'ensemble des cultures, sont liés aux assolements A1, A2, A3.

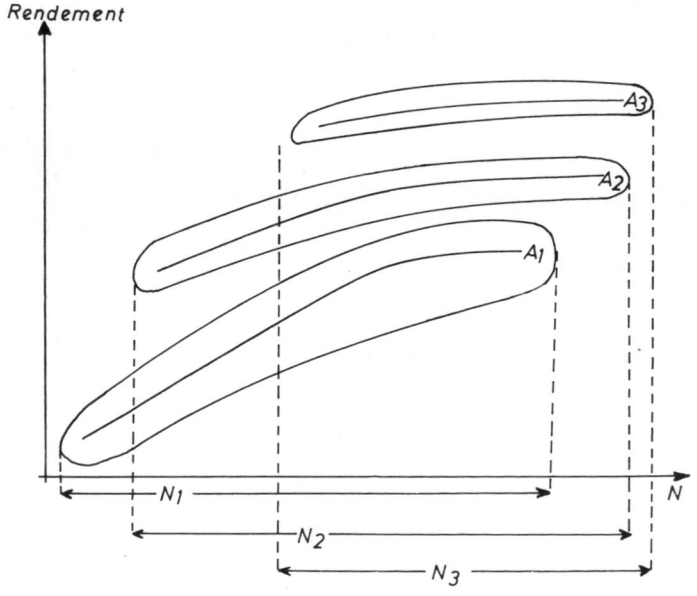


FIG. 11. — *Réponse théorique du blé au facteur azote* (N) *et interaction avec le facteur assolement* (A). On a indiqué dans chaque cas l'ordre de grandeur de la variabilité de la réponse.

Wheat theoretical response to nitrogen factor N and interaction with crop rotation factor A

L'association (A1, N1) caractérise un système de production non spécialisé de type polyculture-élevage, où le blé n'est pas dans sa zone de productivité maximale. L'association (A3, N3) est caractéristique au contraire d'un système très spécialisé, intensif, où les conditions permettent l'utilisation de variétés très productives et l'obtention de rendements maximaux ; on est dans une zone « non économique » où toute augmentation de la fumure produit un gain de rendement non significatif.

En régionalisation sur l'assolement, c'est-à-dire en discriminant les différents assolements A1, A2, A3, on réduit aussi l'intervalle de variation des niveaux de fumure. Ce faisant, on réduit également la variabilité de la réponse possible du blé due à l'interaction entre les facteurs fumure et assolement. Ainsi les futurs modèles, établis pour chacune des situations 1, 2, 3 fourniront une réponse moyenne plus stable que s'ils avaient été établis sur l'ensemble (1 + 2 + 3).

b) *Assurer une certaine homogénéité d'évolution à l'intérieur des groupes.*

Si elle n'a pas permis de réaliser pleinement cet objectif, c'est-à-dire sélectionner des évolutions parfaitement parallèles, l'utilisation du rapport N/N max a du moins permis de regrouper ensemble les départements dont les vitesses moyennes d'évolution de la fumure, pendant la deuxième période, étaient semblables. En effet, en régionalisant sur le critère N/N max, on regroupe des départements tels que 2, 3 et 4 (fig. 12)

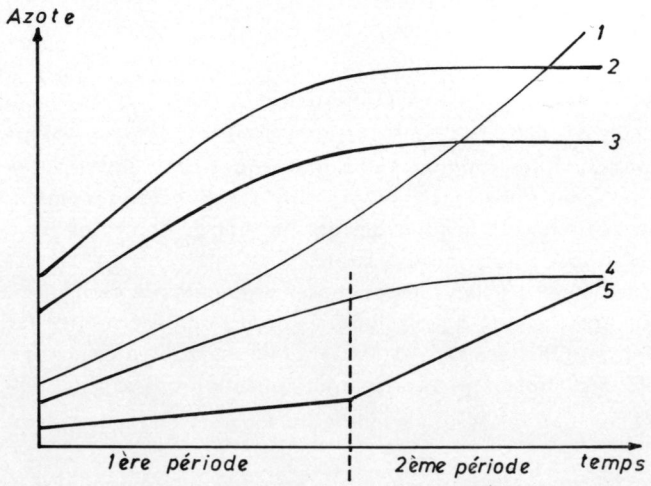


FIG. 12. — *Différents types d'évolution de la fumure azotée au cours du temps.*
Different possible schemes for nitrogen fertilization evolution with time.

et on les discrimine d'un département tel que 1. Comme en plus, le niveau absolu *moyen* de la fumure dépend de l'assolement, on distingue aussi, par l'intermédiaire du critère assolement, les départements 2 et 3 du département 4. Enfin, le fractionnement de l'étude sur deux sous-périodes, permet de discriminer les départements 4 et 5 en faisant apparaître des comportements différents, alors que sur l'ensemble de la période, ils ont une vitesse *moyenne* d'évolution identique (c'est le cas des trois sous-groupes céréalier, fourrager et intermédiaire de la région Centre-Ouest).

Bien sûr, cette recherche d'homogénéité a des limites, ne serait-ce que pour garder des groupes de taille suffisante, c'est-à-dire un nombre de répétitions suffisant pour le futur modèle. Ainsi, on peut se demander si dans notre classification, les nœuds 3 et 3′ sont à prendre en compte.

A cette réserve près, les avantages de l'homogénéisation des évolutions sont importants :

— l'homogénéité de l'évolution *récente* a de fortes chances d'assurer l'homogénité de l'évolution *future* et de garantir une certaine stabilité au modèle établi, pour une région donnée, sur les années récentes. Ces années constituent la « période utile » pour l'élaboration d'un modèle prédictif ; sa détermination est donc très importante,

— elle permet aussi de prendre en compte les facteurs techniques « implicites » dont la vitesse d'évolution est liée (sans préjuger du sens cause-effet) à celle de la fumure (Strizycks et Pous, 1975) : c'est le cas par exemple de la diffusion de nouvelles variétés. Considérons 2 départements (D_1) et (D_2) partis l'année a d'un même niveau moyen N_a de fumure à l'hectare, dont l'un (D_1) atteint le niveau ($N + \Delta N$) l'année $a + 2$, tandis que l'autre (D_2) l'atteint l'année $a + 10$: on peut affirmer que pour (D_1) l'accroissement de fumure a porté sur des variétés de blé pratiquement identiques (au niveau départemental, la diffusion des variétés nouvelles est très progressive) ; pour (D_2) au contraire, les variétés cultivées ont pu changer considérablement et, par leurs potentialités et leurs besoins différents, modifier sensiblement la relation rendement-fumure.

Conclusion

Dans l'état actuel des connaissances analytiques sur l'élaboration du rendement du blé et des méthodes statistiques utilisées dans les modèles agrométéorologiques, la régionalisation des lieux de production, qui permet de contrôler un certain nombre de facteurs, est un préalable indispensable.

L'originalité de cet article est de proposer une méthode de régionalisation objective, fondée sur des facteurs agrotechniques dont l'utilité pour les futurs modèles a déjà été démontrée (Ollivier et Malet, 1979). Cette méthode a en outre le grand intérêt de tenir compte des contraintes liées à la modélisation qui sont :

— réduire les intervalles de variation des facteurs de façon à avoir des réponses stables ;

— assurer à l'intérieur des régions une homogénéité d'évolution qui garantit une certaine qualité prédictive tout en contournant la difficulté qui consiste à régionaliser suivant des facteurs dont on ne connaît pas le poids dans les futurs modèles.

Toutefois, les principales limites de la régionalisation effectuée résident actuellement dans la qualité des données utilisées.

On a déjà souligné l'inadaptation du découpage administratif à ce type d'étude. Le cas de l'Eure-et-Loir est particulièrement illustratif de cet état de fait puisqu'on y distingue en réalité trois systèmes de cultures différents : l'Ouest du département, limitrophe de la Normandie, est de type fourrager ; le Nord-Est (région de Chartres) est la zone typiquement céréalière : la betterave industrielle y a complètement disparu alors qu'on en trouve encore dans le Sud-Est. Déjà, l'échelle infra-départementale

correspondant aux sous-préfectures et pour laquelle les données sont certainement disponibles correspond à des entités naturelles plus homogènes et donnerait, sans aucun doute, une régionalisation plus précise.

De même, une classification des cultures fondée sur des principes agronomiques permettrait une meilleure définition des véritables assolements. On pourrait par exemple distinguer en Beauce les systèmes où la monoculture du blé (ou céréales secondaires) est de règle de ceux où, grâce à des conditions moins sèches (naturelles ou irriguées), la rotation maïs-blé est possible (cf. Hébert, 1976).

La régionalisation obtenue n'est pas seulement valable dans le cas du blé mais pour n'importe quelle culture pratiquée dans l'échantillon de départements considéré (où le blé a une place assez importante).

Toutefois, une meilleure caractérisation des techniques culturales du blé (fumure réellement appliqué au blé, mode d'apport, variétés cultivées...) permettrait d'orienter davantage la régionalisation vers les objectifs de modélisation du rendement. Or, il existe de telles données, très complètes, pour un certain nombre de départements qui font l'objet depuis 1962 des « Enquêtes sur la Production de Céréales » réalisées par le S.C.E.E.S., à l'échelle de l'exploitation agricole (à raison de quatre-vingt exploitations par département). Elles constituent évidemment un matériel de choix pour l'application de notre méthode, que ce soit :

(i) au niveau d'un département ou d'une petite région pour l'étude détaillée des systèmes de culture,

(ii) au niveau de l'ensemble des départements pour un propos tel que le nôtre où l'on veut établir les bases de futurs *modèles agrométéorologiques régionaux*.

Reçu pour publication en février 1980.

Remerciements

Nous remercions vivement Messieurs Ph. Malet et Ch. Baldy, de la Station de Bioclimatologie I.N.R.A. d'Avignon, pour leurs nombreux conseils ainsi que M. J. C. Ferren pour la réalisation des figures.

Summary

A model of the response of wheat to agrotechnical factors

II. — Classification of the french main departments for wheat production

Preliminary regional models are shown to be necessary to elaborate a crop-weather model for yield forecasting at a national scale.

An objective method is proposed which groups into homogeneous regions the twenty-six most important french departments for wheat production (fig. 1). Agrotechnical factors (crop rotation and N.P.K. fertilization) of which the importance upon yield elaboration has been demonstrated in a previous paper (Ollivier and Malet, 1979) are the main elements of this classification. A factorial analysis (correspondence analysis) is used : the chosen grouping criteria are (i) the similarity of the cropping systems (given by the crop rotation) (ii) the homogeneousness of the fertilization evolution (fig. 2 to 9).

These criteria appear to be redundant. As a matter of fact, in the four main regions (fig. 10), each type of crop rotation is characterized by one type of evolution of fertilization. The founded regions are in agreement with the geographic knowledge of french agriculture. The main limits of such a method are related to the intrinsic quality of the available data.

Zusammenfassung

Ein Wirkungsbeispiel der landbautechniken auf weizen

II. — Typologieversuch der hauptsächlichsten weizenerzeugende bezirke

Es wird gezeigt dass die Ausarbeitung eines agrometeorologischen Modells zur Vorhersage des Ertrags (an weizen) in nationalem Ausmasse, zuerst mit der Entwicklung eines regionalen Modells beginnen muss.

Es wird hier eine objektive Regionalisierungsmethodeder 26 Weizen erzeugenden französischen Bezirke vorgeschlagen, die auf agrotechnische Faktoren gestützt ist, deren Wichtigkeit für die Ertragsausarbeitung schon in einem früheren Beitrag dargelegt worden ist. Diese Methode besthet in der Durchführung der faktoriellen Analyse der Übereinstimmungen. Die vorgemerkten Kriterien zur Zusammenfassung der Bezirke in Gebiete, sind : (i) das gleiche Landbausystem (durch Fruchtfolge erfasst) ; (ii) die Homogenität der Düngungsentwicklung.

Diese Kriterien erweisen sich als übermässig, da in vier definierten Hauptgebieten jede Art der Fruchtfolge durch eine Art der Düngungsentwicklung gekennzeichnet ist. Die aussgearbeitete Regionalisierung steht mit der schon bekannten landwirtschaftlichen Geographie Frankreichs in sehr gutem Zusammenhang. Der Wert der zur Verfügung stehenden Daten bildet deren haupsächlichste Grenzen.

РЕЭЮМЕ

Моделирование влияния агротехники на урожай пшеницы.

II. Опыт типологии департаментов, занимающих первые места в производстве зерна.

ОЛЛИВЬЕ М.

Авторы показывают, что изготовление агрометеорологической модели для прогноза урожайности пшеницы в национальном масштабе требует предварительного изготовления районных моделей.

В настоящей статье они описывают метод объективного районирования 26 французских департаментов, занимающих первые места в производстве зерна. Метод основан на агротехнических факторах, роль которых в урожайности была доказана в предыдущей статье. Он употребляет факториальный анализ. Критериями для группировки департаментов служат опознание системы землепользования (i) и гомогенность в развитии внесения удобрений (ii).

Эти критерии оказываются многословными, потому что, в 4 определённых районах, каждый тип севооборота отличается типом развития внесения удобрений. Районы, определённые авторами, совпадают с указаниями сельскохозяйственной географии Франции, но качества данных, находящихся в распоряжении исследователей, являются ограничивающим фактором.

Références bibliographiques

BAIER W., 1977. *Crop-weather models and their use in yield assessments*. Technical note n° 151. W.M.O. n° 458.

BROCHET P., GERBIER N., REMOIS P., 1977. *Etude agrométéorologique du blé tendre d'hiver*. Monographie n° 101 de la Météorologie Nationale.

CAILLIEZ F., PAGES J. P., 1976. *Introduction à l'analyse des données*. S.M.A.S.H. Paris.

HÉBERT J., 1976. Le bassin parisien produit près de 60 p. 100 du blé français. *Fermes modernes*, n° hors série F. 28 « Le blé, céréale d'avenir » p. 170-175.

LEBART L., MORINEAU A., TABARD N., 1977. *Techniques de la description statistique. Méthodes et logiciels pour l'analyse des grands tableaux*. Dunod, Paris, 351 p.

MALET P., 1978. *Perspectives et intérêt de développement pour la communauté européenne des modèles agrométéorologiques de prévision de récoltes susceptibles d'intégrer les diverses données acquises par télédétection*. Rapport pour la Communauté Européenne. ISPRA (Italie), 232 p.

NELSON W. L., DALE R. F., 1978. Effect of trend or technology variables and record period on prediction of corn yield with weather variables. *J. Appl. Meteor.*, **17** (7), 926-933.

OLLIVIER M., MALET P., 1979. Un modèle d'action des techniques culturales sur le blé. I. Principe et premiers résultats, sur une variété cultivée dans un domaine expérimental. *Ann. agron.*, **30** (6), 529-551.

PAGÈS J. P., CAILLIEZ F., ESCOUFIER Y., 1979. Analyse factorielle : un peu d'histoire et de géométrie *Rev. stat. App.* **XXVII** (1), 5-28.

PITTER R. L., 1977. The effect of weather and technology on wheat yield in Oregon. *Agric. Meteorol.*, **18,** 115-131.

STRIZYCKS S., POUS B., 1975. Etude des facteurs influant sur les rendements en blé tendre. *Cah. Stat. Agric.*, **22,** 41-57.

TALLUR B., 1978. *Etude de l'Agriculture régionale française par une méthode de classification automatique.* I.R.I.S.A., publication interne n° 103.

WILLIAMS G. D. V., JOYNT M. I., Mc CORMICK P. A., 1975. Regression analyses of Canadian Prairie crop-district cereal yields 1961-1972, in relation to weather, soil and trend. *Can. J. Soil Sci.*, **55,** 43-53.

Ann. agron., 1980, **31** (2), 191-218.

Incidences du milieu et des techniques culturales sur la longévité du lavandin « Abrial »

R. GRAS (1) et J. CHIAVERINI (2)

avec la collaboration technique de C. MONTANARO (1) et J. P. TOURNIER (1)

(1) *Station d'Agronomie et de Physiologie végétale, I.N.R.A.,*
45, bd du Cap, 06602 Antibes

(2) *Station Zoologique,*
06230 Villefranche-sur-Mer

Résumé

Pour préciser les incidences du milieu et des techniques culturales sur le dépérissement du lavandin Abrial l'information disponible dans les plantations existantes a été utilisée. A cet effet, une enquête a été réalisée ; ses diverses phases sont présentées : préparation, collecte de l'information, examen des données, test des hypothèses.

Le dépérissement est favorisé par les sécheresses, une constitution particulière du profil, les fortes teneurs en calcaire actif, les densités de plantation trop élevées et les binages trop profonds.

Le lavandin, hybride naturel de la lavande vraie ou fine (*Lavandula angustifolia* ou *vera*) et de l'aspic (*Lavandula spica* ou *Latifolia*), est une plante pérenne à parfum, cultivée dans le Sud-Est de la France.

Depuis 1967 (D. D. A., 1972), la durée des plantations ne cesse de décroître surtout pour la variété Abrial, ce qui a accrédité l'idée d'un « dépérissement » du lavandin.

Pour rendre compte de la diminution de longévité des plantations, de nombreuses hypothèses ont été formulées :

nature particulière du végétal, plante quasi sauvage qui s'adapterait mal à la culture intensive ;

multiplication végétative de cet hybride stérile, provoquant sa dégénérescence ;

effets pathogènes de mycoplasmes mis en évidence dans les tubes criblés de la plante.

L'expression « dépérissement jaune à mycoplasme » a été homologuée (Cousin *et al.*, 1970), le dépérissement s'accompagnant d'un jaunissement des plants. Mais les effets pathogènes de ce mycoplasme ne sont pas nets et il est difficile d'expliquer tous les phénomènes de dépérissement par la seule intervention du mycoplasme ;

situations écologiques particulières : caractères extrêmes du sol (humidité, calcaire...), du climat (sécheresse, température, altitude, exposition). Culture de la variété Abrial en dehors de son milieu d'origine qui est la vallée de la Drôme ;

modification des techniques culturales : le manque croissant de personnel et l'intensification de la culture ont provoqué des modifications des techniques culturales sans que

les lavandiculteurs en aient toujours eu pleinement conscience (plantation, lutte contre les mauvaises herbes, récolte...).

Les hypothèses précédentes, pour plausibles qu'elles soient, n'ont en général pas été vérifiées. Il arrive fréquemment qu'à la suite de l'examen d'une situation, une hypothèse soit émise, puis qu'elle se trouve infirmée par les constatations faites dans une autre situation.

On peut se demander si plusieurs causes, agissant seules ou conjuguées, ne sont pas responsables du dépérissement ou si des causes secondaires ne favorisent pas l'action d'une ou plusieurs causes principales.

Ceci nous a conduit à étudier l'incidence du milieu (sol, climat) et des techniques culturales sur le dépérissement.

La vérification d'hypothèses par voie expérimentale, au moyen d'essais en champ par exemple, n'était pas réalisable dans notre cas pour un ensemble de raisons :

— il est impossible de comparer dans le même dispositif expérimental les différentes modalités de variables telles que la constitution du profil pédologique, l'exposition, l'altitude... et, d'une façon générale, beaucoup de variables de milieu, dont on ne peut reconstituer valablement les variations dans un dispositif expérimental ;

— les effets de certaines techniques culturales pouvant être différents suivant les régions, il importerait d'installer des champs d'essai dans chaque situation caractéristique (expérimentation multilocale), ce qui demanderait des moyens considérables ;

— enfin, l'intervention du facteur durée impliquerait d'exploiter les résultats des essais de nombreuses années après leur installation. Les conséquences des facteurs contrôlés sur la longévité d'une plantation pouvant demander beaucoup de temps pour apparaître, l'obtention de résultats est différée d'autant.

On a donc adopté une autre attitude qui consiste à utiliser l'information disponible dans les champs actuellement cultivés, pour lesquels existent de nombreuses variantes tant des techniques culturales que des conditions de milieu. On considère ces champs comme les parcelles d'une vaste expérimentation (que l'on peut qualifier de « sans intervention », Ferrari, 1966), celle-ci n'étant pas planifiée comme, par exemple, dans un essai classique. On utilise donc les données existantes, ce qui pose des problèmes méthodologiques particuliers que nous nous proposons d'exposer dans cet article.

Cette étude peut être appelée *enquête diagnostic* puisqu'elle a pour but de préciser les causes directes ou indirectes à l'origine du dépérissement du lavandin dans un domaine déterminé (milieu physique, technique) ; elle comprend plusieurs phases :

— Préparation : elle consiste à formuler les hypothèses à priori que l'on veut tester et à en déduire l'information à collecter. On précise également comment on constituera l'échantillon des objets étudiés (champs, plants de lavandin).

— Collecte de l'information sur le terrain et auprès des agriculteurs. A son terme, on dispose du corps de données.

— Examen des données. Ce stade permet de préciser les hypothèses déjà formulées, d'en émettre éventuellement d'autres. Il est de plus un préalable nécessaire aux tests des hypothèses.

— Tests statistiques des hypothèses : il s'agit de préciser la validité des hypothèses, compte tenu des effets « parasites » inhérents à la part de variabilité non contrôlée (matériel végétal) et non contrôlable. Cette dernière partie désigne les fac-

teurs qu'il est très difficile d'exprimer numériquement parce qu'on connaît mal leur mode d'action ou que, celui-ci étant connu, on ne dispose pas des données correspondantes.

1. — Préparation

Même en se limitant au domaine des conditions écologiques et des techniques, le champ des hypothèses à tester est très vaste. Ceci implique de collecter un grand nombre de renseignements pour chaque individu observé ; dans le cas présent, l'individu est la parcelle sur laquelle on apprécie la longévité des plants.

1.1. — *Information à collecter en fonction des diverses hypothèses émises*

1.11. *Conditions écologiques.*

- Géographiques : altitude, topographie, exposition.
- Climatique : sur l'intervalle du temps compris entre la plantation et la date d'observation (durée des plants), on a considéré :
  - — un indice de déficit en eau moyen, quotient du déficit cumulé sur la durée des plants par cette durée exprimée en mois. Le déficit cumulé s'obtient en calculant mois par mois un bilan de l'eau à partir de l'évapotranspiration potentielle climatique (Turc, 1967), de la pluie et de la réserve facilement utilisable du sol. La réserve facilement utilisable est le produit [capacité au champ (Gras 1962 ; Chiaverini et Gras, 1977) — point de flétrissement] × profondeur d'enracinement × densité apparente partielle de terre fine × coefficient 0,6. Ce coefficient empirique a été introduit pour traduire le fait que dans les régions méridionales, toute l'eau utile n'est pas facilement utilisable ;
  - — indice de déficit en eau annuel le plus élevé. C'est le déficit annuel maximum qui s'est produit au cours de la durée des plants. Le calcul est fait mois par mois comme ci-dessus ;
  - — température minima moyenne : moyenne des températures moyennes minimales du mois le plus froid de chaque année et températures minima : moyenne des minima du mois le plus froid enregistré.
- Sol : sur une tranchée, description du profil cultural (Hénin *et al.*, 1969) et évaluation de la teneur volumique en cailloux (volume de cailloux)/(volume de cailloux + volume de terre fine).

Sur échantillon de terre : granulométrie, matière organique, instabilité structurale : log 10 I_S (Hénin *et al.*, 1956), pH eau, calcaires total et actif, phosphore assimilable (Truog), potasse et magnésie échangeable. Sur la solution d'extraction du calcaire actif Galet (1951), dosage du fer selon la technique de Juste *et al.*, (1972) afin de calculer un indice de chlorose : 100 calcaire actif (p. 100 de terre)/fer (p.p.m. de terre).

1.12. *Techniques culturales* mises en œuvre depuis la plantation jusqu'à la récolte.

Plantation : précédent cultural, préparation du sol (travail, fumure), mise en place des plants, disposition et densité des plants à l'ha. Pour préciser les conditions de

plantation, un indice climatique de sécheresse après la plantation a été calculé. Son principe consiste à préciser si la couche de terre superficielle où se trouvent les racines des boutures s'est desséchée dans les 2 mois suivant la plantation lorsque celle-ci est postérieure à février, ou les 2 mois de mars et d'avril pour les plantations d'automne et d'hiver (jusqu'à février inclus).

On examine donc si le déficit climatique ETP-P (ETP : évapotranspiration potentielle Turc, P : pluviométrie) est plus grand ou plus faible que la quantité d'eau qui peut s'évaporer de la couche superficielle et qui est de l'ordre de 30 mm par mois. On peut ainsi caractériser, 1 et 2 étant l'indice des 2 mois :

l'absence de sécheresse par

$$(ETP - P)_1 + (ETP - P)_2 < 2 \times 30$$

la sécheresse par

$$(ETP - P)_1 + (ETP - P)_2 > 2 \times 30$$

la forte sécheresse par

$$(ETP - P)_1 + (ETP - P)_2 > 2\,(2 \times 30)\,.$$

Entretien de la culture : fumures, lutte contre les mauvaises herbes.

Récolte, à la main ou à la machine.

1.13. *Caractérisation du matériel végétal.*

Pour chaque parcelle (champ entier ou partie de champ homogène du point de vue sol et date de plantation du matériel végétal), on a considéré un échantillon des

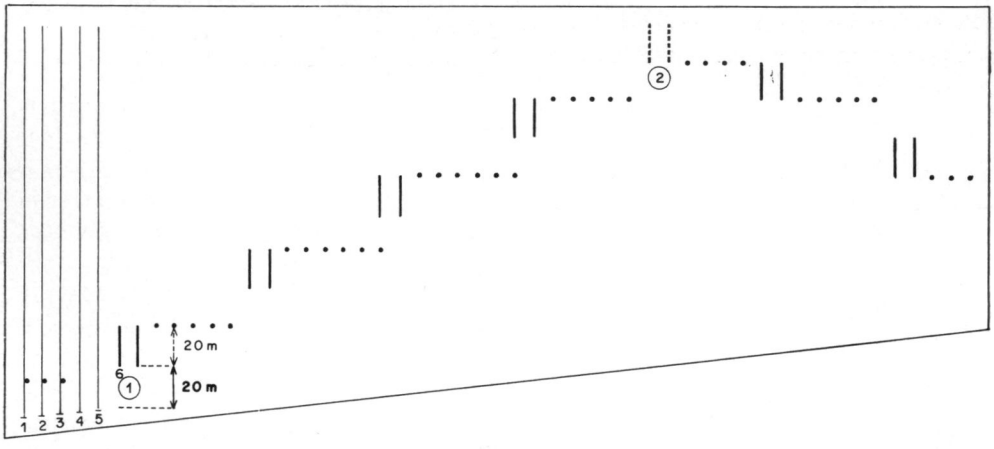


FIG. 1. — *Exemple de constitution de l'échantillon des plants pour un champ.* 1) Le premier segment étudié est sur la 6e ligne à partir du bord et son extrémité est à 20 m du plant en bout de ligne. 2) Le segment trop proche du bord du champ n'est pas pris en considération. Par contre on ne saute pas une longueur de 20 m lors du choix suivant.

ligne | | segment étudié.

Example of sampling plants in a field. 1) The first segment of line is on the 6th row from the edge and begins at 20 m from the edge plant. 2) The segment, which is too near the field edge, is not considered. But a 20 m length is not turned over in the next choice.

plants en déplaçant de façon systématique une chaîne d'arpenteur de 20 m suivant les lignes de plants ou les alignements de plants perpendiculaires à la plus grande dimension du champ (fig. 1).

Sur cet échantillon, on a noté le nombre de plants morts, presque morts, ayant des rameaux morts ; les colorations particulières, jaune notamment, ont également été enregistrées ainsi que le diamètre et la hauteur maximum des parties aériennes.

Enfin, on a tenté de voir si, toutes conditions égales par ailleurs (même champ et donc même micro-climat et mêmes techniques), des différences de sol pouvaient intervenir sur le dépérissement. A cet effet, on a choisi un plan normal, c'est-à-dire bien développé, sans coloration jaune et rameau mort et un plan jaune lorsqu'il en existait ou de petite taille dans le cas contraire. Une tranchée creusée près de chacun de ces plants permet d'examiner l'enracinement et le profil cultural. Les caractéristiques du système radiculaire telles que son extension verticale et horizontale, la répartition des racines et leurs directions ont été observées.

En l'absence de connaissances *a priori* sur la façon dont certains facteurs interviennent, on est conduit parfois à les traduire par différentes variables, d'où une certaine redondance apparente. Par exemple, le climat est appréhendé en plus de la température par deux indices de déficit en eau, l'un moyen (effet cumulatif), l'autre, le plus élevé (effet instantané).

1.2. — *L'échantillon des champs étudiés*

Il s'agit de constituer à partir de l'ensemble des parcelles (population) un sous-ensemble réduit, l'échantillon représentatif ayant les principaux traits de la population. Pour que chaque élément constitutif de la population ait la même probabilité d'appartenir à l'échantillon, la seule possibilité théorique est le tirage au hasard des parcelles qui constitueront l'échantillon.

Les considérations précédentes définissent un modèle dont il faut se rapprocher, mais qu'il est très difficile de réaliser pour plusieurs raisons :

— il n'existe pas une liste des parcelles qui constituent la population et, en dresser une représenterait un travail considérable,

— certains renseignements concernant la parcelle (plantation, fertilisation...) doivent être obtenus des agriculteurs eux-mêmes. Or, seulement certains d'entre eux possèdent ces renseignements ; on est donc conduit à considérer une sous-population de parcelles, celles appartenant à des agriculteurs capables de fournir l'information qu'on recherche. Il faut remarquer que si chaque fois que l'information sur une parcelle n'est pas disponible, on recommençait le tirage au hasard jusqu'à ce qu'on obtienne une parcelle à information disponible, on constituerait en fait l'échantillon à partir de la sous-population précédemment définie.

Enfin surtout, nous cherchons plus à mettre en évidence des liaisons entre les paramètres qu'à obtenir une évaluation non biaisée de leurs moyennes.

En définitive et malgré les inconvénients que cela comporte, l'échantillon a été constitué par choix dirigé, parce que c'était une façon de tester les hypothèses qui nous intéressaient.

2. — Collecte de l'information

Elle s'est effectuée en dehors des périodes de repos végétatif, c'est-à-dire d'avril à octobre pendant les années 1973 et 1974.

Pour la constitution de l'échantillon, nous avons été guidés par les considérations suivantes :

— disposer d'une gamme étendue « d'intensités » du dépérissement, ce qui implique de considérer à côté des départements très touchés (Alpes-de-Haute-Provence), d'autres qui l'étaient fort peu (Drôme). Les parcelles étudiées ont donc été réparties dans toute la zone de production du Sud-Est,

— dans un souci de représentativité, faire une stratification par département, le nombre de parcelles examinées par département étant fixé au prorata de la surface plantée en lavandin,

— obtenir dans chaque situation la totalité de l'information souhaitable, d'où le choix des propriétaires des champs au sein de la sous-population des producteurs suivis ou connus par les organismes professionnels.

Au cours de la collecte, on s'est efforcé de veiller à ce que les champs soient répartis régulièrement dans l'aire de production de chaque département, et, simultanément, de couvrir une grande étendue de la gamme de variation de paramètres tels que la topographie, l'altitude, la texture du sol, les techniques culturales, la « technicité » de l'exploitant etc... Ce faisant, on s'est donné la possibilité de vérifier l'influence de certains de ces paramètres, on a évité des biais d'échantillonnage et enfin, on a pallié en partie les inconvénients de l'absence de tirage au hasard.

Compte tenu de l'étendue du champ des hypothèses (collecte de beaucoup de renseignements par individu statistique), de l'extension géographique de la zone d'enquête (déplacements), de la durée réduite de la période de végétation active et du nombre des contacts préalables avec les techniciens agricoles et les agriculteurs, l'échantillon des champs a été moins grand que nous l'avions souhaité.

La collecte a concerné cinquante-neuf champs. Comme trois d'entre eux ont été subdivisés pour tenir compte d'hétérogénéités évidentes du sol ou des techniques, on disposait de soixante-deux parcelles. En fait, des renseignements manquant sur deux d'entre elles, soixante parcelles seulement ont été utilisées pour certains traitements statistiques.

3. — Examen des données

Les données sont hétérogènes en ce sens qu'on peut les classer en deux groupes selon qu'elles apparaissent sous forme de nombres (*variables quantitatives*) ou de modalités (*variables qualitatives*).

Les variables quantitatives peuvent être soit *discrètes* (ou de dénombrement) et ne prendre que des valeurs entières non négatives (exemple : nombre de plants morts), soit *continues* (mesures) (exemple : hauteur d'un plant).

Les variables qualitatives peuvent être *sans structure* (*polytomie non ordonnées*) (exemple : les précédents culturaux du lavandin : polyculture, verger...) ou *avec structure* (*polytomie ordonnée*). Dans ce dernier cas, il existe une hiérarchie *a priori*

entre les modalités ; lorsqu'il n'en existe que deux, il s'agit d'une *dichotomie* (exemple : état sanitaire des racines bon ou mauvais) (Tomassonne, 1976*a*).

Cette hétérogénéité des données est une source de difficultés, les méthodes statistiques actuellement disponibles ne s'appliquant facilement que pour des variables de même nature.

Cette phase d'examen des données ou d'« analyse des données exploratoire » comprend l'étude des variables considérées individuellement, de leurs liaisons deux à deux et, enfin, l'examen global de tableaux de chiffres au moyen d'analyses factorielles.

3.1. — *Variables considérées individuellement*

Pour les variables qualitatives, les effectifs des diverses modalités sont recensés. Les histogrammes de répartition des variables quantitatives sont construits en utilisant pour le choix du nombre c de classes, les indications de Doane (1976) :

$$c = 1 + \log_2 n + \Delta ,$$

n : nombre d'observations, Δ = correction, si la distribution est dissymétrique. Avec soixante observations, cela donne sept classes pour une distribution symétrique, et dix à peu près pour une distribution dissymétrique, Δ étant de l'ordre de 3.

Tableaux et histogrammes sont répartis en planches par grandes rubriques (milieu, technique...) de façon à présenter les principaux traits de la culture du lavandin dans le Sud-Est de la France.

L'altitude présente une gamme étendue de variations (fig. 2*a*). Les sols, souvent caillouteux, ont des teneurs en matière organique normale (fig. 3*a*) pour leur texture

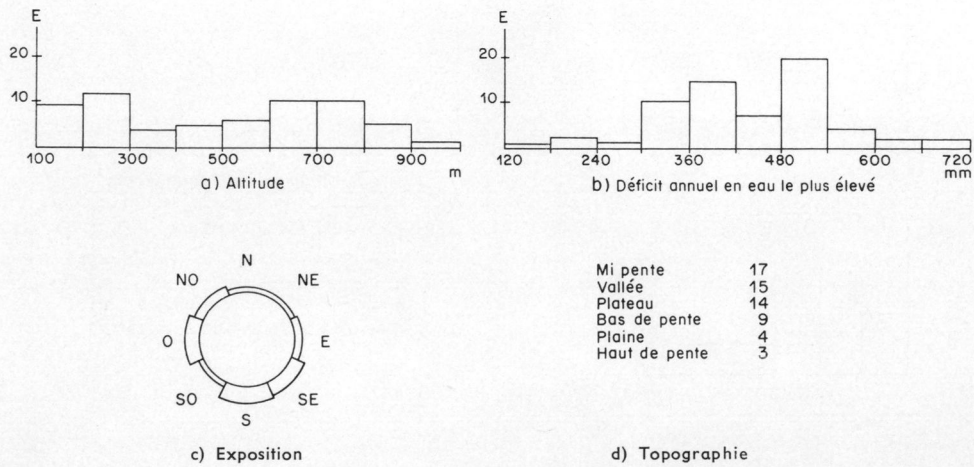


FIG. 2. — *Culture du lavandin : Géographie et climatologie. a*) Altitude ; *b*) Déficit annuel en eau le plus élevé ; *c*) Exposition ; *d*) Topographie.

Lavender culture : geography and climatology. a) Altitude ; *b*) Greatest annual water deficit ; *c*) Exposure ; *d*) Topography.

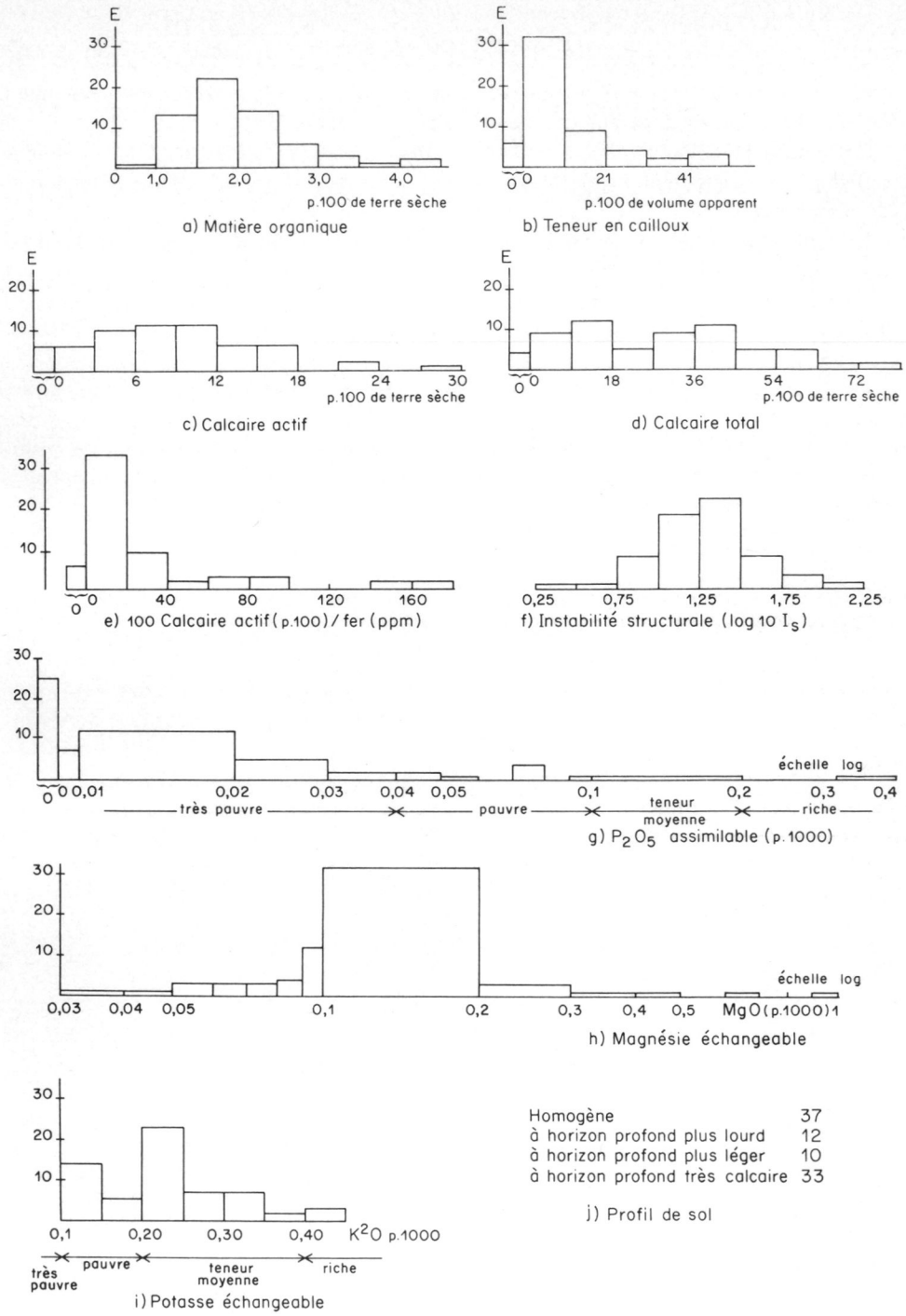


FIG. 3. — *Culture du lavandin : sol.* A gauche de l'abscisse zéro est donné l'effectif des individus pour lesquels la variable a une valeur nulle. *a*) Matière organique ; *b*) Teneur en cailloux ; *c*) Calcaire actif ; *d*) Calcaire total ; e) Rapport calcaire actif (p. 100) sur fer (ppm) ; *f*) Instabilité structurale (log 10 Is) ; *g*) Phosphore assimilable ; *h*) Magnésie échangeable ; *i*) Potasse échangeable.

Lavender culture : soil. To the left of zero abscissa the number of individuals having a zero value is drawn. *a*) Organic matter ; *b*) Stones ; *c*) Active limestone ; *d*) Limestone ; e) Ratio active limestone (p. 100)/iron (ppm) ; *f*) Instability of structure (log 10 Is) ; *g*) Available phosphorus ; *h*) Exchangeable magnesium ; *i*) Exchangeable potassium.

assez légère (fig. 4). L'indice calcaire actif/fer (fig. 3c) a une gamme de variation importante. Le précédent cultural a souvent la modalité polyculture (fig. 5a). Il existe une grande variété de préparation du sol avant la plantation (fig. 5c) et des modes d'entretien du sol (tabl. 1 et fig. 6). Il y a peu de champs pour lesquels les plants ont

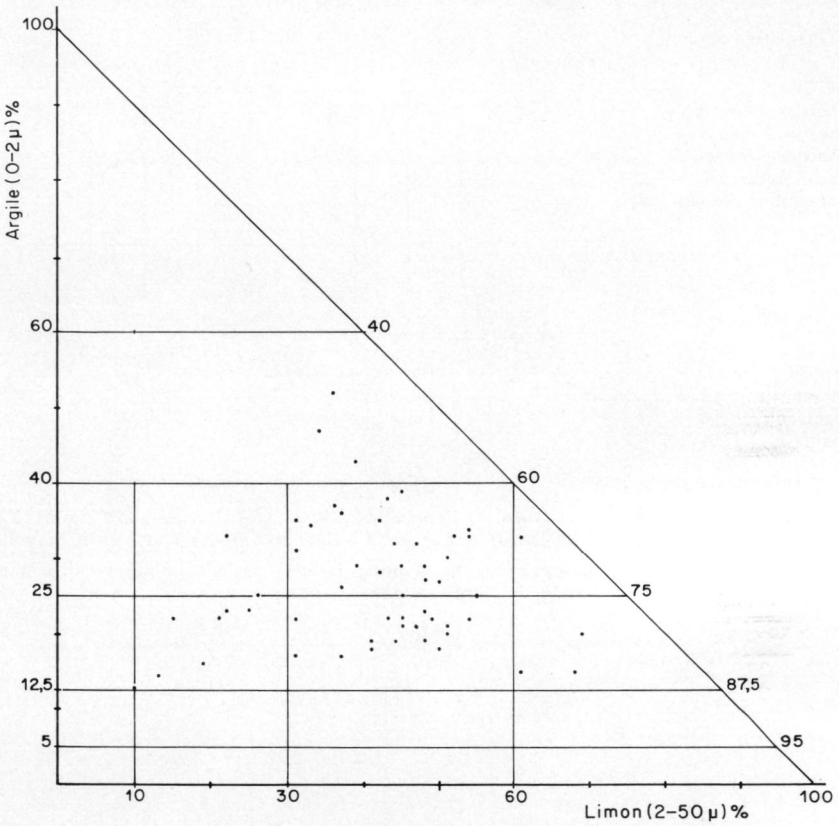


FIG. 4. — *Culture du lavandin : texture des horizons supérieurs.*
Lavender culture : upper horizons texture.

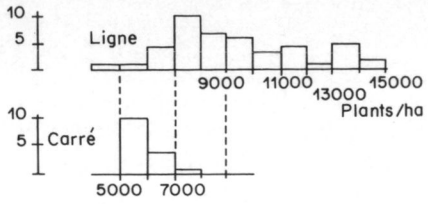
TABLEAU 1

Modes d'entretien du sol
Soil management

A la machine { bineuse ...	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0
A la machine { vigneronne	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Désherbant	+	0	+		+	+	0	0	+	0	0	+	+	0	0	0
A la main les 1res années..	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	+
A la main les années suivantes	0	0	+	+	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	0
Pâturage d'animaux.....	0	0	0	0	+	0	+	0	0	+	0	+	0	+	0	0
Effectif	1	2	1	3	1	10	4	16	2	1	0	2	1	3	4	1
Morts + presque morts (p. 100).....	0	3,5	10	6,6	6	6,8	1,5	11,1	7,5	0	10,7	8	0	5,5	5,2	12

Polyculture	35
Lavande-lavandin	12
Jachère	10
Défriche chêne pubescent	2
Lande à labiées	1
Lande a graminées	1
Défriche de chataigniers	1
Verger	1
Vigne	1

a) Précédent cultural



b) Nombre de plants à l'ha.

Charrue ordinaire	+	+	+	+				
Charrue à disques					+			+	+
Charrue balance					+	+	+		
Sous-soleuse	+	+				+		+	
Appareil de pseudo-labour	+		+		+		+	+	+
	15	1	30	3	1	1	6	3	2

c) Préparation du sol avant la plantation

Pioche	20
Fourchette	15
Machine	14
Plantoir	13

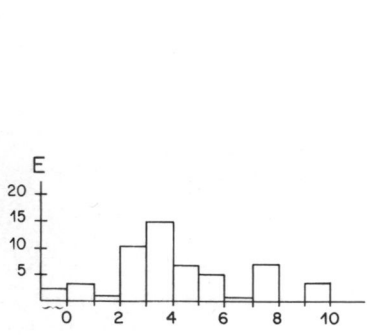
d) Mise en place des plants

Pas de sécheresse	40
Sécheresse	17
Forte sécheresse	5

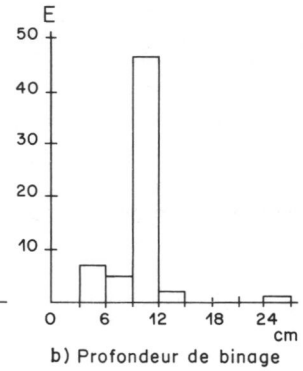
e) Sécheresse après la plantation

FIG. 5. — *Culture du lavandin : plantation. a)* Précédent cultural ; *b)* Nombre de plants à l'ha ; c) Préparation du sol avant la plantation ; *d)* Mise en place des plants ; e) Sécheresse après la plantation.

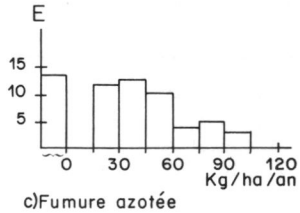
Lavender culture : planting. a) Previous crop ; *b)* Planting density ; *c)* Soil management before planting ; e) Drought after planting.



a) Nombre de passages d'outils d'entretien par an



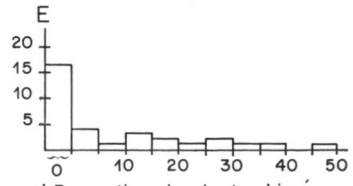
b) Profondeur de binage



c) Fumure azotée

à la machine	33
à la main	29

d) Récolte



e) Proportion de plants abimés par la machine à récolter par champ

FIG. 6. — *Culture du lavandin : entretien et récolte. a)* Nombre annuel de passages d'outils d'entretien ; *b)* Profondeur de binage ; *c)* Fumure azotée, *d)* Récolte ; e) Proportion de plants abîmés par la machine à récolter par champ.

Lavender culture : soil management and harvest. a) Implement passages in a year ; *b)* Cultivation depth ; *c)* Nitrogen dressing ; *d)* Harvest ; e) Percentage of plants damaged by harvest machine.

des colorations particulières (fig. 7*b*), la proportion de plants jaunes par champ est très faible. Par contre, la proportion de plants morts et presque morts varie de 0 à 36 p. 100.

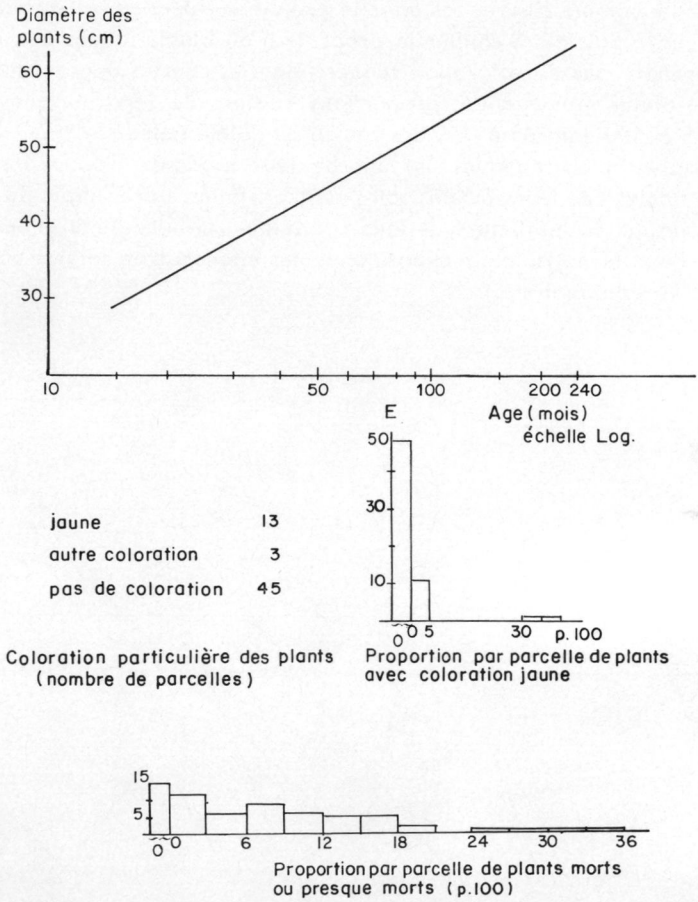


FIG. 7. — *Culture du lavandin : état des plants. a*) Diamètre des plants en fonction de l'âge ; *b*) Coloration particulière des plants ; *c*) Proportion par parcelle de plants avec coloration jaune ; *d*) Proportion par parcelle de plants morts ou presque morts.

Lavender culture : plants. a) Variation of plant diameter with age ; *b*) Peculiar plant colour ; *c*) Percentage of yellow coloured plants ; *d*) Percentage of dead plants and almost dead plants.

L'examen des histogrammes révèle des distributions plus ou moins normales. Certaines sont bimodales, telle l'altitude (fig. 2*a*) ; dans ce cas, on peut envisager pour certains traitements de la transformer en variable qualitative à deux modalités selon, par exemple, que l'altitude est inférieure ou supérieure à 400 m.

Les distributions unimodales peuvent être dissymétriques de deux façons : la classe modale n'est pas placée au centre de l'intervalle de variation (ex. : matière organique, fig. 3*a*) ; l'histogramme peut être plus ou moins tronqué, en ce sens que les classes de faibles valeurs de la variable sont absentes (ex. : potasse échangeable, fig. 3*i*).

Une telle troncature est particulièrement marquée pour la variable proportion de plants morts et presque morts (taux de mortalité, fig. 7) ; malheureusement des transformations telles que log x, log (a + x) ou $\sqrt{x}$ ne peuvent rendre la distribution moins anormale comme c'est le cas pour la première catégorie de dissymétrie.

Il n'est guère possible d'étudier la proportion de plants jaunes par champ. Un codage coloration, pas de coloration suggéré par les effectifs opposerait la proportion nulle de plants jaunes à des proportions voisines de zéro puisque celle-ci est inférieure à 5 p. 100 dans 69 p. 100 des cas où elle a été notée.

Des variables dichotomiques ont une de leur modalité trop peu représentée pour qu'une analyse de leurs actions soit possible : fumure organique du précédent, fumure de fond minérale, fumure de fond organique, fumure d'entretien organique et minérale. Pour la polytomie « exposition », les effectifs trop faibles par modalité interdisent aussi une analyse.

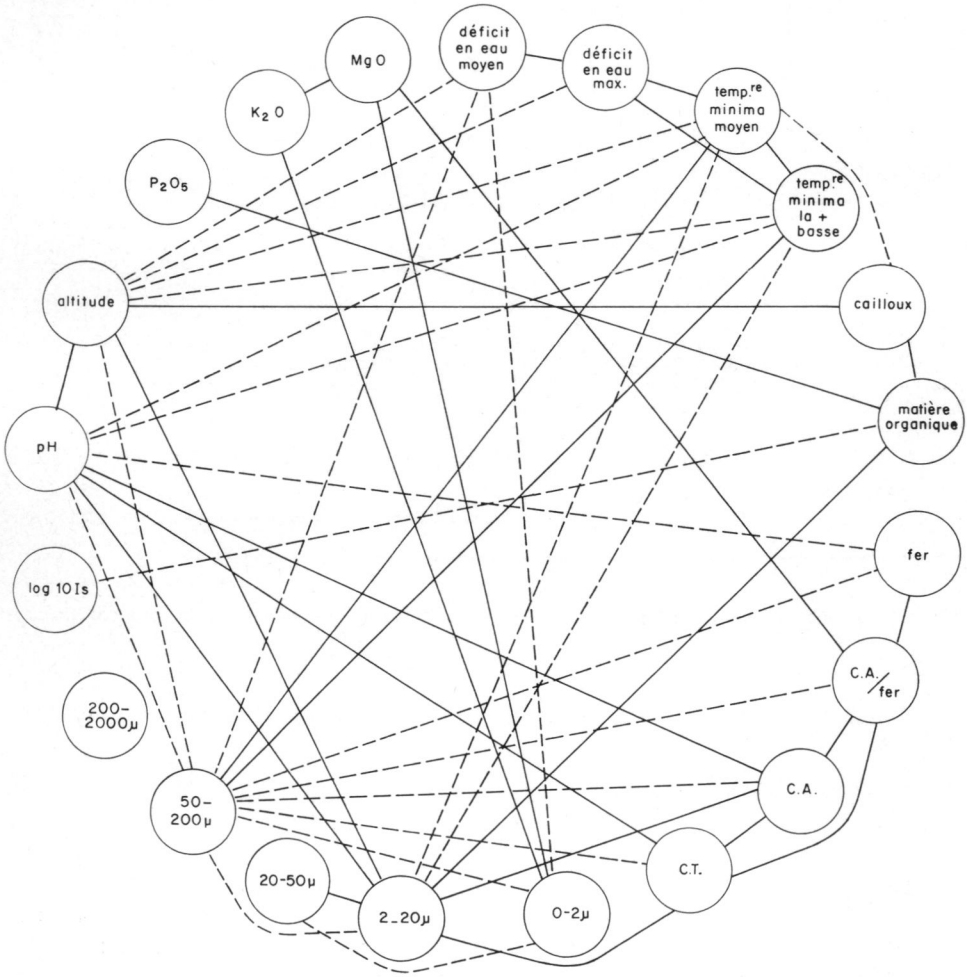


FIG. 8. — *Correlations entre les variables climat-sol.* Coefficients de corrélation significatifs à 5 p. 100 au moins. —— liaison positive, — — — liaison négative.

Correlation between climate and soil variables. Correlation coefficients significant at the 5 p. 100 level.

3.2. — *Relations deux à deux entre variables*

Nous distinguerons les variables à *expliquer* : taux de mortalité (p. 100 de plants morts et presque morts), taux de plants jaunes, des autres variables qualifiées *d'explicatives*.

3.21. *Variables explicatives.*

Les coefficients de corrélation linéaires entre les variables quantitatives sont regroupés par rubriques : climat-sol (fig. 8), milieu et technique (fig. 9) et végétal (fig. 10).

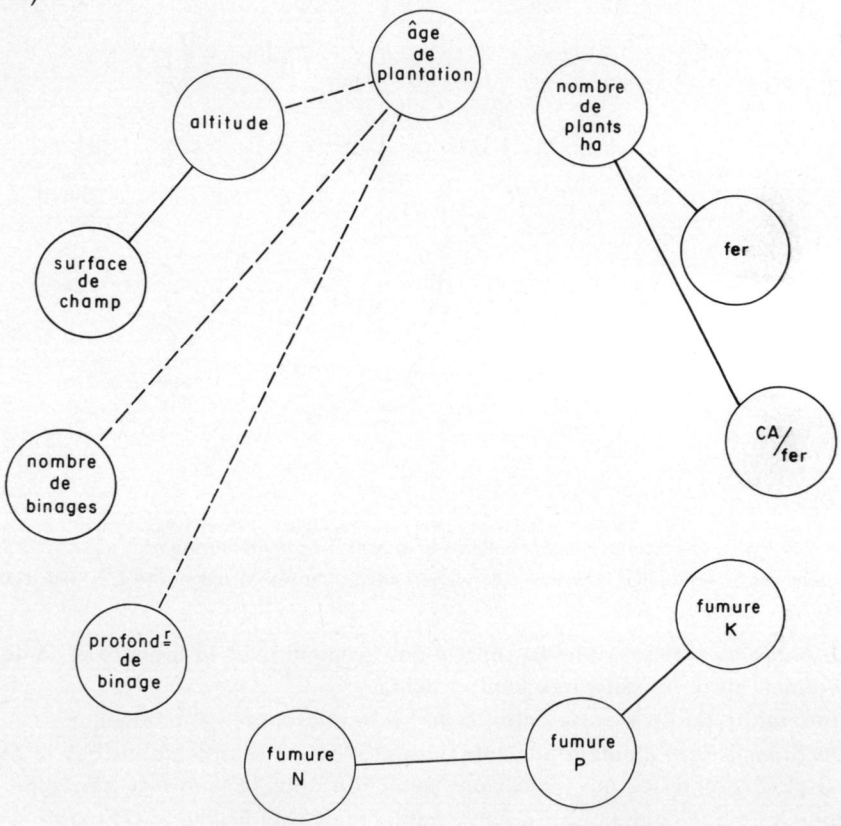


FIG. 9. — *Correlations entre les variables milieu-technique.*
Coefficients de corrélation significatifs à 5 p. 100 au moins.

Correlations between environmental and technical variables.
Correlation coefficients significant at the 5 p. 100 level.

L'altitude est corrélée positivement ou négativement avec de nombreuses variables pouvant avoir des actions de sens opposé sur la longévité. Il sera donc difficile de faire apparaître un effet « altitude ».

On retrouve les corrélations entre les fractions granulométriques parce que leur somme est à peu près constante.

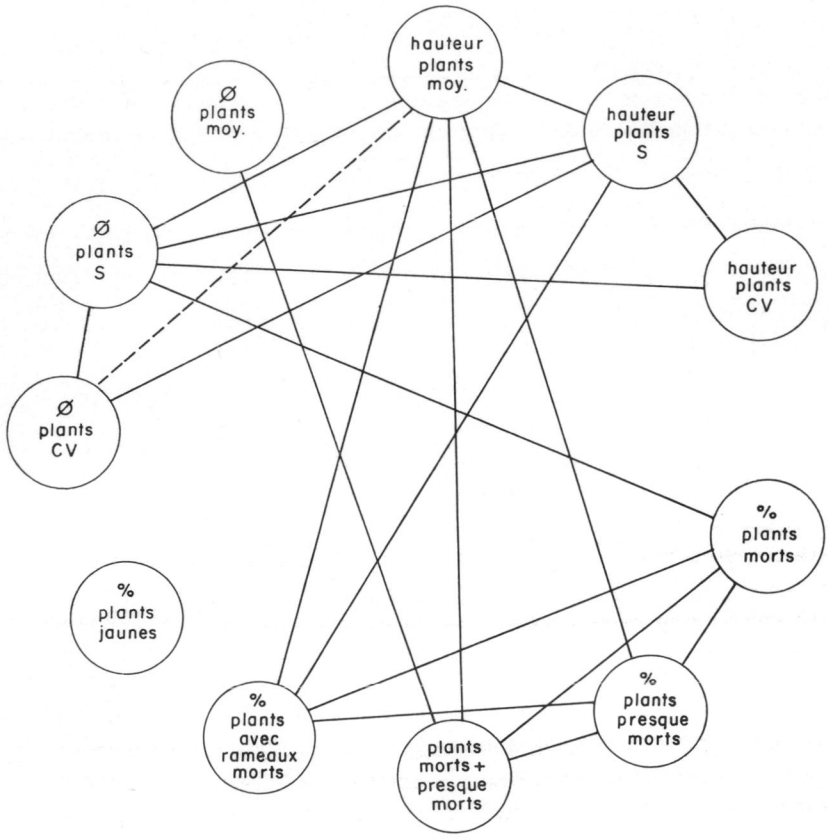


FIG. 10. — *Corrélations entre les variables « végétal ».*
Coefficients de corrélation significatifs à 5 p. 100 au moins.
Correlations between plant variables. Correlation coefficient significant at the 5 p. 100 level.

Le phosphore assimilable est corrélé positivement avec la matière organique et négativement avec les calcaires total et actif.

Une liaison positive existe entre les fumures phosphatée et potassique.

Les binages sont d'autant plus fréquents et d'autant plus profonds que la plantation est plus récente, ce qui traduit une évolution dans le temps de ces techniques.

Pour les plants, une liaison positive faible, mais significative * (1) existe entre la proportion des plants morts et presque morts et les dimensions des plants vivants au moment de l'observation... Entre la proportion des plants morts et presque morts et la proportion de plants jaunes en vie au moment de l'observation, la corrélation est pratiquement nulle (coefficient de 0,005 8). Indiquons pour mémoire que quoique des liaisons puissent exister entre variables qualitatives et quantitatives, elles ne seront signalées qu'ultérieurement (Cf. § 4).

(1) Seuils de signification.
N. S. : supérieur à 10 p. 100 ; • : 10 p. 100 ; * : 5 p. 100 ; ** : 1 p. 100 ; *** : 0,1 p. 100.

3.22. *Relations entre le taux de mortalité et les variables explicatives.*

Les valeurs des coefficients de correlation r suggèrent des liaisons plausibles entre le taux de mortalité et la durée de la plantation ($r = 0{,}37$ **), la teneur en magnésie du sol ($r = 0{,}37$ **), l'indice de déficit en eau le plus élevé ($r = 0{,}29$ *), l'indice de besoin en eau moyen ($r = 0{,}23$ •) et le p ($r = 0{,}23$ •).

L'examen de la valeur du taux de mortalité suivant les modalités des variables qualitatives donne comme possible l'intervention de la sécheresse après la plantation, de la topographie et du binage après la récolte.

3.3. — *Analyses factorielles des correspondances* (AFC)

D'une façon générale, *l'analyse factorielle* consiste à créer de nouvelles variables synthétiques (combinaisons des variables initiales), qui traduisent la plus grande partie de la variation totale d'un tableau de données ; ces nouvelles variables sont rangées dans l'ordre d'explication décroissante. Chaque observation est représentée par un point sur un plan défini par les axes portant les variables synthétiques. Ces méthodes ne nécessitent aucune condition restrictive sur la distribution des variables puisqu'elles ne comportent pas, en général, de test d'hypothèse.

Comme l'AFC ne peut analyser tel quel un ensemble de données hétérogènes (qualitatives et quantitatives), les variables quantitatives sont transformées en polytomie ordonnée, les valeurs de la variable étant réparties en classes. Par exemple, les soixante valeurs de la variable potasse échangeable du sol ont été réparties en quatre classes d'effectif 15, dont les intervalles sont différents. En effet, la perte d'information est minima lorsque les classes sont équiprobables et en nombre maximal (Tomassone, 1976). A noter que lorsqu'une variable prend plusieurs fois la même valeur, on ne peut obtenir des classes équiprobables.

L'AFC fait plus ressortir les valeurs relatives des variables que leur grandeur absolue, comme c'est le cas de l'analyse en composantes principales.

Une première AFC a été réalisée sur le tableau comprenant en ligne les parcelles et en colonne leurs caractéristiques (modalités de quarante-cinq variables qualitatives et quantitatives). Elle a été décevante parce que les premières variables synthétiques, les facteurs (f) ne traduisent qu'une proportion très faible de la variabilité totale, (f1 : 5,40 p. 100 ; f2 : 4,44 p. 100 ; f3 : 4,08 p. 100) et il faut arriver au 16e facteur pour que le pourcentage cumulé de la variabilité prise en compte, dépasse 50. Les premiers graphiques ne condensent donc pas l'essentiel de l'information. Les points représentatifs des parcelles sont bien groupés par département dans le premier plan factoriel par l'intermédiaire de variables géographiques et climatiques, ce qui est évident, et aussi de certaines variables techniques, ce qui l'est moins.

Une AFC plus intéressante a été faite sur le tableau comportant en ligne les huit classes du taux de mortalité et en colonnes, les modalités des quarante-cinq variables qualitatives ou quantitatives. Les trois premiers facteurs traduisent 50,9 p. 100 de la variation totale (f1 : 18,4 p. 100 ; f2 : 16,8 p. 100 ; f3 : 15,6 p. 100).

a) Les points représentatifs des classes de mortalités ne se placent pas de façon ordonnée sur une parabole (effet Guttman), ce qui aurait indiqué une liaison linéaire de la mortalité avec les variables de l'axe 1.

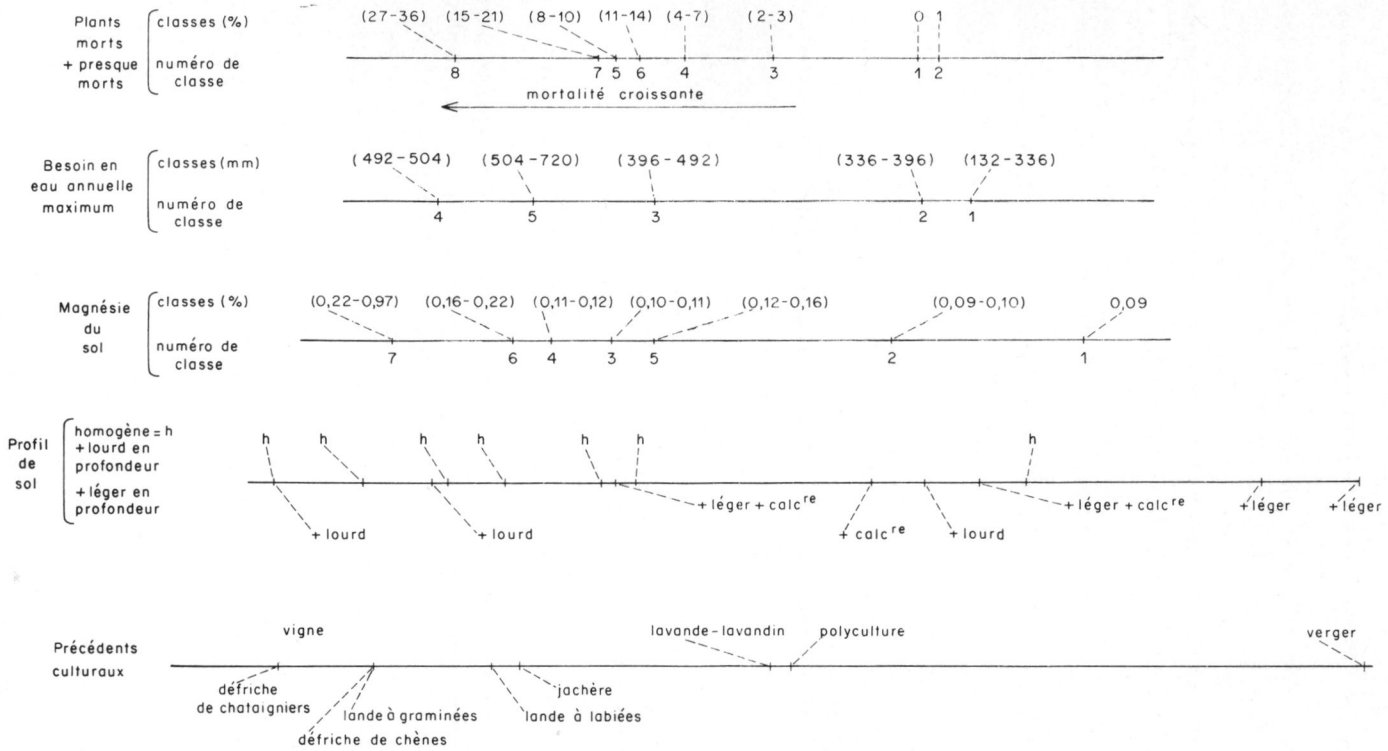


FIG. 11. — *Projection des points représentatifs de variables sur l'axe* 2.
Analyse factorielle de correspondance.

Projection of dots depicing variables on the 2 *axis.* Factor analysis : reciprocal averaging.

Cependant, les projections sur l'axe 2 des classes de mortalités sont à peu près rangées par ordre croissant. On a alors considéré les variables qui, ayant des composantes importantes sur l'axe 2, sont à peu près rangées. Ce sont, le précédent cultural (mortalité élevée pour les défriches), la constitution du profil de sol (mortalité moindre pour les profils comprenant en profondeur, un horizon plus léger s'opposant aux profils homogènes ou plus lourds), le besoin en eau annuel maximum, la teneur en magnésie du sol (fig. 11).

b) La proximité entre des points représentatifs des variables et des classes de mortalité suggère une action possible vraisemblablement monotone de la profondeur de binage et du rapport calcaire actif/fer.

Par ailleurs, dans les axes 1-2 et 1-4, la mortalité d'épasserait 8-10 p. 100 et 15-21 p. 100 respectivement lorsque le nombre de plants à l'ha dépasse 10 000.

Une autre caractéristique importante de ces données est leur non orthogonalité, ce qui ne saurait surprendre puisqu'elles ne proviennent pas d'une expérience planifiée avec dispositif orthogonal. Pour les variables qualitatives, la non orthogonalité provient du fait que les effectifs des diverses modalités d'une variable ne sont pas les mêmes (exemple = précédents culturaux, fig. 5). La non-orthogonalité des variables explicatives quantitatives provient des liaisons entre elles. Dans les deux cas, on ne peut séparer les actions des variables sur la variable à expliquer (fig. 12) ; il y a également diminution de la puissance du test, c'est-à-dire de la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle lorsqu'elle est fausse.

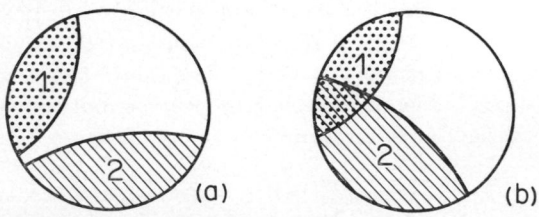


FIG. 12. — *Orthogonalité* (a) *et non orthogonalité* (*b*) *de deux variables* 1 *et* 2 *qualitatives ou quantitatives.* Aire du cercle : variation de la variable quantitative à expliquer ; aire pointillée : explication par variable 1 seule ; aire hachurée : explication par la variable 2 seule.

Orthogonality (*a*) *and non orthogonality* (*b*) *of two variables* 1 *and* 2, *qualitative or quantitative.* Circle area : variation of the variable to be explained ; dotted area : explanation by variable 1 ; dashed area : explanation by variable 2.

Au terme de l'examen des données, leurs particularités sont mieux connues et leur pouvoir explicatif apprécié. Le traitement statistique ultérieur est orienté, qu'il s'agisse de transformations (log x, $\sqrt{x}$) ou de codages. L'examen des données permet en outre, de préciser certaines hypothèses (notamment seuil de variables quantitatives telles que la densité de plantation), voire d'en formuler de nouvelles. Enfin des erreurs d'analyses de sol, d'enregistrement, de transcription peuvent être décelées.

4. — Tests des hypothèses

4.1. — *Taux de mortalité*

Les hypothèses suggérées dans les phases précédentes doivent être testées si possible dans un modèle statistique global pour plusieurs raisons.

Les liaisons deux à deux (corrélation par exemple) constituent une information, qui, considérée seule, peut être dangereuse, la corrélation n'impliquant pas de causalité, une liaison entre deux variables peut provenir de l'intervention d'un autre variable (fig. 13).

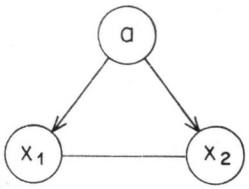


FIG. 13. — *Liaison entre variables.* La liaison entre x_1 et x_2 provient du fait que x_1 et x_2 dépendent toutes deux de la variable « a ».

Correlation between variables. The correlation between x_1 and x_2 comes from the fact that x_1 and x_2 depends on the « a » variable.

Un modèle global permet de réaliser un bilan de l'information apportée par les diverses variables et d'éviter des redondances.

L'utilisation d'un modèle global présente aussi l'avantage d'améliorer la sensibilité des tests statistiques en réduisant la variance résiduelle. Analyser successivement les effets de diverses variables consiste en effet, à tester l'effet de chacune d'elle par rapport à une variation résiduelle comprenant, en plus de la part irréductible, une partie des effets des autres variables (fig. 14). Indiquons à ce sujet qu'on peut être amené à introduire dans un modèle global et donc à enregistrer certaines variables même si elles ne font pas l'objet de la recherche. Par exemple pour le lavandin, l'âge a été noté parce qu'il peut être un paramètre important pour les plantes perennes.

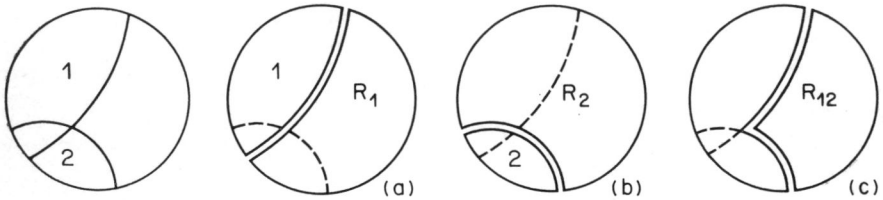


FIG. 14. — *Variations résiduelles pour le test séparé de la variable* 1 (a), *le test séparé de la variable* 2 (*b*) *et le test de variables* 1 *et* 2 *considérées ensemble* (c). Variables 1 and 2 non orthogonales, R : variation résiduelle.

Residual variations for separate test of the 1 *variable* (a), *separate test of* 2 *variable* (b) *and conjugate test of* 1 *and* 2 *variables.* Variables 1 and 2 non orthogonal. R = residual variation.

Indiquons tout d'abord que l'utilisation pour tester les hypothèses de la statistique inférentielle paramétrique (utilisant les paramètres de la distribution : moyenne variance) résulte d'un compromis entre les conditions d'emploi strictes de ces méthodes et la nature plus ou moins normale des variables étudiées et en particulier de la variable à expliquer, le taux de mortalité.

Le modèle utilisé est celui de l'analyse de covariance qui « explique » une variable quantitative y (en l'espèce le taux de mortalité) par les effets d'une variable quan-

titative x (« covariable » ou variable dans la suite du texte, exemple : profondeur de binage) ou de plusieurs, et d'une variable qualitative (« facteur » dans la suite du texte, exemple : précédent cultural) ou de plusieurs.

Ce modèle, analogue à celui utilisé en expérimentation, peut être considéré comme une régression dont le terme constant serait déterminé par les modalités du facteur : $y = a + bx$, avec $a = a_1$ pour le précédent 1 et $a = a_2$ pour le précédent 2, d'où

$$y_1 = a_1 + bx_1 , \qquad y_2 = a_1 + bx_2 .$$

x_1 et x_2, valeurs respectives de x pour les observations y_1 et y_2.

Il faut remarquer que les variables x ne sont pas réellement des covariables parce que leurs valeurs ne résultent pas d'actions antérieures à celles des facteurs comme c'est le cas en expérimentation même si les valeurs des x sont mesurées et non contrôlées dans les deux cas (Duby et Millier, 1974 ; Gigout et Masson, 1976).

Il eut été souhaitable de tester à l'aide du modèle précédent, toutes, ou du moins la plus grande partie des variables collectées ; mais l'exiguïté de l'échantillon des parcelles (60) impliquée par l'étendue du champ des hypothèses n'a pas permis d'opérer ainsi. En se basant sur les résultats de l'examen des données (cf. § 3), on a donc sélectionné les variables à tester et éventuellement regroupé des modalités de facteurs lorsque certaines étaient trop peu représentées.

En définitive, les variables au sens large testées dans le modèle global de covariances sont :

— huit facteurs dont nous donnons les regroupements de modalités (nombre de modalités entre parenthèses) :

- Topographie (4) : 1 : plateau ; 2 : mi-pente ; 3 : haut de pente + bas de pente ; 4 : vallée + plaine.
- Classement par profil (2) : 1 : texture identique sur le profil et texture plus lourde en profondeur ; 2 : texture plus légère.
- Précédent cultural (2) : 1 : culture regroupant polyculture, lavande lavandin, jachère, verger, vigne ; 2 : non culture regroupant lande ou garrigue à graminées, lande ou garrigue à labiées, défriche de chataîgnier.
- Fumure du précédent cultural (2) : 1 (oui), 2 (non).
- Origine des plants (2) : 1 : propriétaires, organismes professionnels, origine diverse ; 2 : pépiniériste.
- Sécheresse à la plantation (2) : 1 : pas de sécheresse ; 2 : sécheresse + forte sécheresse.
- Binage après récolte (2) : 1 : avec ; 2 : sans.
- Présence de sole de pseudo labour (2) : 1 : oui ; 2 : non.

Le nombre de degrés de liberté attaché à ce groupe de facteur est de 10, compte tenu du fait que chaque facteur intervient avec autant de degrés de liberté moins un qu'il a de modalités.

— 10 variables : indice de besoin en eau le plus élevé, teneur en éléments 0-2 μ, pH à l'eau, calcaire total, calcaire actif/fer, fer, magnésie du sol, âge de plantation, profondeur de travail d'entretien du sol, nombre de passages d'outils d'entretien Cet ensemble représente 10 degrés de liberté.

Le nombre de degrés de liberté de la variance résiduelle est donc de 39.

Deux programmes de calcul ont été utilisés : ANOVA directive COVARIATE issu du langage GENSTAT de génération de modèle (Nelder *et al.*, 1973) et COVAR (Gigout et Masson, 1976).

Ces deux programmes comprennent d'abord *des analyses de variance multifactorielles* examinant les effets des facteurs sur la variable à expliquer et les covariables et l'*analyse de covariance proprement dite* sur le taux de mortalité dont les résultats sont donnés dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Analyse de covariance : influence des facteurs et de l'ensemble des covariables sur le taux de mortalité

Covariance analysis : Effect of factors and covariables on mortality

	ANOVA		COVAR	
	en l'absence des covariables	en présence des covariables	en l'absence des covariables	en présence des covariables
Facteurs				
Sécheresse après plantation.....	*	*	*	*
Constitution du profil...	**	*	*	—
Précédent cultural.....	*	**	•	—
Fumure du précédent...	*	•	*	—
Topographie	*	N. S.	•	—
Ensemble des covariables		N. S.		N. S.

— Facteur non analysé.

Les résultats ne sont pas exactement les mêmes, les procédures de calcul sur données non orthogonales étant différentes. En effet, les tests d'ANOVA dépendent de l'ordre d'introduction des facteurs dans le modèle, tandis que ceux de COVAR n'en dépendent pas. Les analyses de variance ont mis aussi en évidence les liaisons entre facteurs et variables : topographie liée au calcaire total *, au pH ** et au rapport calcaire actif/fer * — précédent cultural lié à la texture *, à la teneur en magnésie * et à la profondeur de binage * — sécheresse à plantation et indice de déficit en eau maximum **.

Enfin la variation totale du taux de mortalité se décomposant en variation INTER ou B (de between groups) due aux facteurs et en variation INTRA ou W (de within groups) ou résiduelle, des analyses ont été faites à partir des éléments de la variation INTRA :

— *une régression progressive* (Fels *et al.*, 1973) entre le taux de mortalité et les variables. Ces variables n'étant pas orthogonales, on a utilisé la régression multiple progressive. Elle consiste à introduire les variables successivement et dans un ordre tel que leurs contributions soient décroissantes. Par exemple (fig. 15) avec deux variables x_1 et x_2. On calcule successivement :

- la régression simple $y - x_2$ (1er palier) puisque aire ABCDA > aire EBDCE ;
- la régression double $y - x_2 - x_1$ (2e palier).

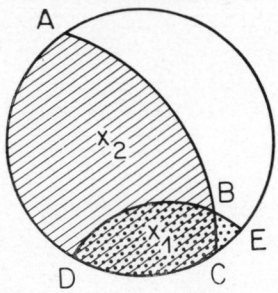


FIG. 15. — *Régression progressive entre une variable à expliquer y (cercle) et deux variables explicatives* x_1 *(aire pointillée) et* x_2 *(aire hachurée) non orthogonales.* L'explication par x_2 étant supérieure à celle de x_1, on calcule au premier palier y (x_2) et au deuxième palier y (x_2, x_1) ; dans ce dernier cas l'intervention de x_1 est traduite par l'aire BCE.

Multiple regression with forward selection. Variable to be explained : y ; Explaining variable x_1 ; dotted area ; Explaining variable x_2 : dashed area. The explanation with x_2 being above x_1 explanation, one must calculate first y(x_2) and then y (x_2, x_1).

On remarque que dès le 2e palier, on ne considère que la part de variation qui n'est pas prise en compte par les variables introduites auparavant : dans l'exemple, on ne considère au 2e palier de la contribution de x_1 que l'aire BCE.

Introduite la première, x_1 serait intervenue avec la contribution EBDCE plus importante que BCE : la signification des variables dépend de leur ordre d'introduction.

La profondeur de travail d'entretien introduite au 1er palier est significative * ; le rapport calcaire actif/fer introduit dès le 2e palier est significatif à un seuil d'au moins 10 p. 100 (* pour certains paliers). Cette deuxième variable n'étant pas corrélée avec la première ($r = 0{,}004$) apporte bien une information spécifique et ne peut corriger un effet non linéaire éventuel de la profondeur de travail d'entretien sur le taux de mortalité ;

— *une analyse en composante principale normée* (ACP) réalisée sur les variables explicatives de la matrice INTRA de corrélation (tabl. 3). Les données quantitatives sont représentées dans un système d'axes portant les composantes principales (CP).

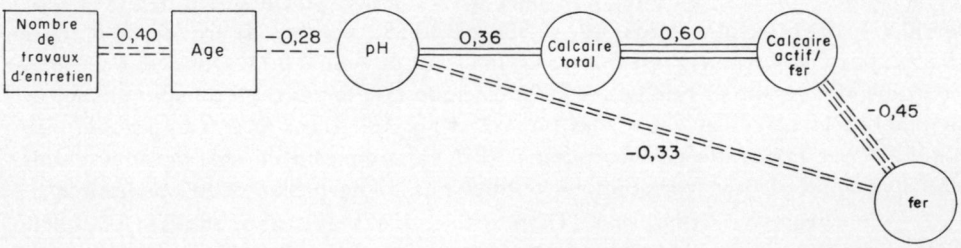


FIG. 16. — *Variables essentielles de la première composante principale des variables de la matrice Intra de correlation.* —— Corrélation positive ; — — — Corrélation négative ; Seuils de signification : — 5 p. 100, = 1 p. 100, ≡ 0,1 p. 100.

Main variables of the first principal component of the W correlation matrix.

TABLEAU 3

Matrice de corrélation INTRA
W correlation matrix

1. Besoin eau le plus élevé..	0,1										
2. 0-2 μ.....		0,1									
3. pH eau.....			0,1								
4. Calcaire total.....	0,23		0,36 **	0,1							
5. Calcaire actif/fer.....				0,60 ***	0,1						
6. Fer			— 0,33 *		— 0,45 ***	0,1					
7. MgO		0,43 **			0,38 **		0,1				
8. Age	0,32 *	0,42 **	— 0,28 *			0,25		0,1			
9. Profr travail d'entretien..							0,34 *		0,1		
10. Nombre de passages d'outils								— 40 **		0,1	
11. Taux de mortalité : (morts + presque morts).....	0,02	0,04	— 0,13	0,13	0,22	0,10	0,24	0,16	0,26	— 0,03	0,1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Coefficients de corrélation calculés une fois les effets des facteurs retirés. Valeurs limites des coefficients de corrélation pour quarante-neuf degrés de liberté :
10 p. 100 : 0,230 ; * : 5 p. 100 : 0,273 ; ** : 1 p. 100 : 0,354 ; *** : 0,1 p. 100 : 0,443.

Une interprétation des composantes principales au vu des variables qui contribuent le plus à leur construction n'est guère possible que pour la première : parmi les 10 variables initiales, les 6 les plus liées à CP1 sont : calcaire actif/fer ($r = 0,69$), fer (0,67), calcaire total (0,65), âge (0,58), pH (0,55), nombre de travaux d'entretien (0,39) ; pour les variables suivantes, r est inférieur ou égal à 0,11. Dans ces 6 variables se trouvent 4 variables relatives à l'état calcique et à la réaction du sol qui sont évidemment très corrélées entre elles (tabl. 2 et fig. 16). Dans la 2e composante interviennent par importance décroissante : (0-2 μ), magnésie du sol, âge des plants ; l'hétérogénéité de ces variables ne permet pas d'interpréter cette composante ;

— *une régression orthogonale* (Thomassone, 1967) ou orthogonalisée (Dagnélie, 1975) entre le taux de mortalité et les composantes principales définies ci-dessus, qui, indépendantes entre elles, par définition, peuvent donc être testées indépendamment les unes des autres, ce qui n'était pas le cas pour les variables initiales. Seule est significative la CP7 *, la CP9 étant signification au seuil 10 p. 100 seulement. La difficulté

est déplacée au niveau de l'interprétation des composantes principales qui, on vient de le voir, n'a pu être faite.

La différence entre le test sur l'ensemble des covariables (N. S.) et ceux des variables de la régression progressive provient pour une part de différences entre les degrés de liberté $= 50 - 10 - 10 = 30$ pour le test global et $59 - 1 = 58$ et $59 - 2 = 57$ pour les 1er et 2e palier respectivement de la régression progressive.

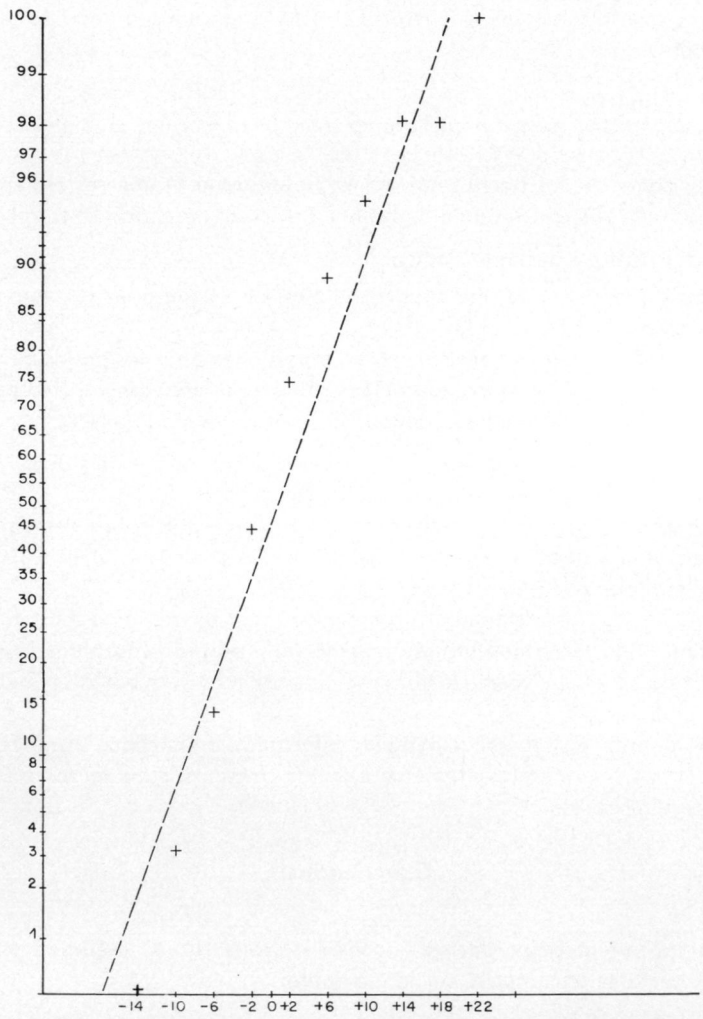


FIG. 17. — *Courbe cumulative de répartition des résidus de la variable à expliquer* « p. 100 *morts* + *presque morts* », *après introduction de huit facteurs et de dix covariables.* Abscisse : écart entre les valeurs mesurées et calculées ; ordonnée : probabilité cumulée transformée. Dans le cas d'une répartition normale les points sont sur une droite.

Cumulative repartition curve of residuals of the explained variable dead + *almost dead plants* » *the explaining variables being eight factors and ten covariables.* Abscissa : discrepancy between measured and calculated values ; Ordinates : transformed cumulative probability. For a normal cumulative frequency curve the dots are on a straight line.

La variable à expliquer n'étant pas distribuée normalement, un problème de validité statistique se pose. Les résidus de l'analyse de covariance étant distribués à peu près normalement (fig. 17), les résultats peuvent être considérés comme valables.

En définitive, les paramètres intervenant sur la longévité sont : la sécheresse après la plantation, la constitution du profil, le précédent cultural, la profondeur du travail d'entretien et le rapport calcaire actif/fer du sol. Le taux d'explication du modèle de covariance est de 55 p. 100. Par ailleurs, une analyse en table de contingence suggère que la mortalité dépasse 13 p. 100 lorsque le nombre de plants à l'ha dépasse 10 000 •.

4.2. — *Comparaison dans chaque champ d'un plant normal et d'un plant chétif*

En ce qui concerne les parties aériennes, hauteurs et diamètres étaient différents puisque ces dimensions constituaient le critère principal de choix.

Pour ce qui est du système radiculaire :

— la cote de la racine la plus superficielle est analogue pour les deux catégories de plants ;

— la profondeur maxima des racines est plus élevée pour les plants normaux ***;

— l'épaisseur exploitée par les racines, différence des deux cotes précédentes, est plus grande de 5,5 cm en moyenne pour les plants normaux ***.

La répartition des racines (uniforme, en une seule nappe, en deux nappes) ne fait pas apparaître de liaison nette avec l'état des plants.

Le système radiculaire des plants normaux présente plus fréquemment une symétrie axiale *** et une abondance plus importante des racines *. Ceci entraîne que le sol est mieux exploité par les racines.

L'irrégularité de l'enracinement provient de l'état du sol à la plantation (structure, humidité), de la technique utilisée pour la mise en place du plant, mais aussi du système radiculaire de la bouture ligneuse qui est très souvent dissymétrique à la sortie de la pépinière.

On peut penser qu'un enracinement défectueux empêchera un développement normal des plants, l'eau et les éléments nutritifs présents dans le sol n'étant, de ce fait, pas tous utilisables.

Conclusions

Elles comprennent deux parties : considérations sur la méthode employée et incidences de certains paramètres sur la mortalité.

A) *Méthode employée*

L'utilisation de données collectées *in situ* revêtait un caractère de nécessité, compte tenu de la nature du problème : culture peu étudiée du point de vue agronomique, vaste champ d'hypothèses, difficultés de reconstituer une grande partie des variables dans un dispositif expérimental, durée d'une expérimentation éventuelle.

La grande étendue du champ des hypothèses nous a contraints à accroître la

quantité d'informations collectée pour chaque individu de l'échantillon au détriment de l'effectif de cet échantillon.

Une augmentation substantielle de cet effectif aurait permis d'améliorer la représentativité de celui-ci, de scinder le corps des données en deux parties, l'une servant à préciser ou à formuler des hypothèses, l'autre à les tester, enfin d'avoir la possibilité de tester plus de variables dans le modèle global qui exige un degré de liberté total élevé.

Pour cette étude qui remonte à quelques années, on a utilisé pour tester les hypothèses, des méthodes inférentielles paramétriques dont les conditions d'emploi n'ont pas toujours été strictement respectées. Ceci joint à la non-orthogonalité des données et au caractère non aléatoire de l'échantillon implique une certaine prudence dans la présentation des résultats. Il est cependant possible dans une certaine mesure d'avancer des causes plausibles de mortalité.

A l'avenir, il faudra envisager pour des travaux de ce genre, l'utilisation de méthodes non paramétriques qui sont déjà opérationnelles (coefficients d'association...) ou doivent l'être prochainement (covariance).

B) *Mortalité du lavandin*

Les effets des principaux paramètres qui interviennent sont commentés brièvement :

Alimentation en eau du végétal : Une sécheresse marquée après la plantation augmente le taux de mortalité de 6 à 11,6 p. 100. Comme pour 77 p. 100 des parcelles, les plants n'ayant pas repris sont remplacés, la moindre reprise des plants consécutive à la sécheresse après plantation intervient peu sur la variable taux de mortalité. Il faut donc admettre, soit un effet indirect de la mauvaise reprise (les plants de remplacement présentant une moindre longévité parce que, plantés trop tard en saison, ils ont beaucoup plus de risques de souffrir de la sécheresse par suite d'un enracinement insuffisant), soit que la sécheresse favorise la mortalité ultérieure des plants qui ont repris.

Le paramètre sécheresse après la plantation traduit vraisemblablement aussi l'effet du besoin en eau le plus élevé auquel il est fortement lié. Ceci est cohérent avec :

— la liaison positive significative obtenue sur d'autres données entre la durée de plantation et l'indice climatique de potentialité de Turc qui fait intervenir la sécheresse (Gras, 1975) ;

— la coïncidence notée par Caire (1970) entre l'intensité des dépérissements et la sécheresse.

Dans le même ordre d'idées, Bordas *et al.* (1932) signalent pour la longévité de la lavande un effet défavorable de l'exposition sud, qui en élevant la température en été, accentue le déficit en eau. Un tel effet n'a pu être analysé, mais paraît peu vraisemblable au vu des données, peut-être parce que l'exposition nord, par exemple, peut présenter l'inconvénient de températures trop basses en hiver.

Constitution du profil : la mortalité de 3,4 p. 100 pour les profils à horizons profonds plus légers passe à 8,9 p. 100 pour les profils homogènes ou à horizons plus lourds. Cette différence s'expliquerait par des dynamiques de l'eau différentes, un horizon plus léger en profondeur améliorant le ressuyage des horizons supérieurs.

Carence ferrique induite par le calcaire actif : Le taux de mortalité et le rapport calcaire actif/fer varient parallèlement : la mortalité augmente lorsque le taux de calcaire actif croît et lorsque la quantité de fer facilement extractible diminue. Quoique calcicole, le lavandin serait sensible à la chlorose ferrique provoquée par les excès de calcaire fin. Courtant (1963, 1974) indique à ce sujet que le lavandin serait moins calcicole que la lavande.

Il est donc possible qu'une partie au moins des jaunissements puissent provenir de chlorose ferrique ; ce pourrait être notamment le cas de colorations jaunes labiles signalées par Caire (1970) et constatées aussi par nous-mêmes. Soulignons à ce sujet la faible proportion de plants jaunes trouvée dans chaque champ, ce qui tendrait à montrer que le dépérissement jaune à mycoplasme n'est pas la seule cause de mortalité.

Indiquons aussi qu'il est difficile de séparer l'action du calcaire sur la chlorose, de ses effets sur les propriétés physiques analysés par Chiaverini (1976) : augmentation de l'eau utile et diminution de la stabilité structurale.

Précédent cultural : Lorsque le lavandin est précédé par une culture, sa mortalité est plus faible (7,5 p. 100) que lorsqu'il est planté sur lande, garrigue ou défriche (13 p. 100).

Des actions du genre sécrétion racinaires ne pouvant être retenues, il s'agit certainement d'effets indirects liés à la nature du précédent.

Les précédents « cultures » sont plus riches, seulement pour le phosphore (0,021 p. 100 entre 0,004 p. 100 en moyenne) ; leur texture serait également plus légère ; il est possible que les sols les plus lourds aient été mis en culture en dernier à cause de l'effort de traction nécessaire plus élevé ; les conséquences de la culture (travail du sol, mélange de la matière organique des résidus de récolte...) peuvent aussi intervenir.

La mortalité n'est pas systématiquement plus élevée lorsque le lavandin est précédé par une lavande ou un lavandin. Cependant, Caire (1970) signale pour un champ une augmentation de mortalité (5,6 p. 100 à 11,9 p. 100) non significative (seuil 20 p. 100) liée au précédent lavandin.

Densité de la plantation : Pour les densités de plantation supérieures à 10 000 plants/ha, la mortalité est plus élevée, ce qui est en accord avec Courtant (1965), qui signale que trop serrer les plants sur le rang réduit la longévité. Compte tenu de l'importance, pour la longévité, de l'alimentation en eau, une disposition trop serrée des plants diminue le volume de sol accessible aux racines de chaque plant et donc, la quantité d'eau disponible.

Un enracinement irrégulier diminuant encore le volume de sol exploité par les racines accentue l'effet précédent.

Rappelons aussi que les plants sont plus serrés dans le cas de la plantation en ligne.

Profondeur du travail d'entretien : La mortalité augmente avec la profondeur des binages. Un travail trop profond du sol a pour conséquences le bris des racines superficielles qui jouent un grand rôle pour l'absorption des éléments fertilisants (la couche superficielle est la plus riche) et des petites pluies qui, n'humectant le sol qu'en surface, sont évaporées en l'absence de racines.

Cette étude met en évidence le rôle du système radiculaire et de sa bonne répartition dans le profil sur la résistance à la sécheresse du lavandin.

Ces résultats suggèrent d'améliorer la longévité par les actions suivantes : éviter les sols ayant en profondeur une couche plus lourde et/ou contenant trop de calcaire fin, ne pas planter tout de suite sur une défriche, augmenter la quantité d'eau disponible pour chaque plant par un labour profond avant la plantation (préférable à un sous-solage) et par un écartement plus grand des plants entre eux, enfin réduire la profondeur des binages.

Reçu pour publication en février 1976.

Summary

Effects of the environment and cultivation techniques on the life expectancy of the « Abrial » lavandin

To define more accurately the effects of the environment and cultivation techniques on withering of the « Abrial » Lavandin, the available information was derived from field trials. Accordingly, a survey was carried out in several stages, including : preparation, data gathering and investigation, testing and assumptions.

Withering is furthered by droughts, specific types of soil profiles, active-limestone content, too closely-spaced plantings and too deep hoeing.

Zusammenfassung

Auswirkungen der Umwelt und der Anbautechniken auf die Lebensdauer der Lavendelhybrides « Abrial »

Es wurden die in den bestehenden Anpflanzungen zur Verfügung stehenden Auskünfte, benützt, am die Auswirkung der Umwelt und der Anbautechniken auf das Absterben des Lavendelhybrides « Abrial » genau zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde eine Untersuchung eingeleitet, deren verschiedene Entwicklungsstufen dargelegt werden : Vorbereitung, Einzeihung der Auskünfte, Untersuchung der Daten, Test der Voraussetzungen.

Das Absterven wird durch die Dürren, eine besondere Struktur des Geländes, starken Gehalt an aktivem Kalk, durch zu grosse Anbaudichten und zu tiefes Umhacken begünstigt.

РЕЭЮМЕ

Влияние окружающей среды и агротехники на увядание *Lavandula hybrida* « Abrial ».

ГРА Р., КИАВЕРИНИ Ж.

Для определения влияния окружающей среды и агротехники на увядание *Lavandula hybrida* « Abrial » употребились данные, собранные в существующих насаждениях. С этой целью произвели анкету, разные стадии которой излагаются в настоящей статье : подготовка, сбор и обсуждение данных, исследование гипотез.

Увяданию способствуют засуха, особенный состав профиля, высокое содержание активного известняка, чрезмерная плотность насаждения, слишком глубокая перепашка.

Références bibliographiques

BORDAS P., JOESSEL P. H., ANRES E., 1932. Enquête sur les dépérissements de la lavande. *Annales des épiphyties*, **18** (6), 368-383.

CAIRE G., 1970. *Enquête sur la culture et le dépérissement du lavandin*. Rapport de stage de fin d'étude. Station d'Agronomie Antibes, I.N.R.A., 71 p.

CHIAVERINI J., 1976. *Recherches sur les sols calcaires des lavanderaies du Sud-Est de la France. Liaisons entre quelques paramètres physiques et chimiques*. Thèse de doctorat de spécialité. Laboratoire de Botanique. Faculté des sciences et des techniques, Nice, 127 p.

CHIAVERINI J., GRAS R., 1977. Comparaison de quelques méthodes d'évaluation au laboratoire de la capacité au champ. *Ann. agron.*, **28,** 445-461.

COURTANT M., 1965. *Lavandes et lavandins. Caractères de culture et de production*. Service Central des enquêtes et des études statistiques. Ministère de l'Agriculture, 23 p.

COURTANT M., 1974. Lavande et lavandins, Regards sur l'espace rural Provence Côte d'Azur. *Regard sur la France*, S.P.E.I., 119-128.

COUSIN M. Th., MOREAU J. P., STARON T., FAIVRE-AMIOT A., 1970. Le dépérissement jaune du lavandin, nouvelle maladie à mycoplasme. *Ann. phytopathol.*, 227-237.

DAGNÉLIE P., 1975. *L'analyse des composantes et l'analyse factorielle. Analyse statistique à plusieurs variables*, 1 vol., Vander, 165-224.

D. D. A. des Alpes-de-Haute-Provence, 1972. *Rapports sur les dégâts provoqués en* 1971 *par le dépérissement des cultures de lavandin dans les régions de Valensole et de la montagne de Haute-Provence*, 17 p.

DOANE D. P., 1976. Aesthetic frequency classifications. *Amer. Statistician*, **31,** 181-183 in Chambers J. M., 1977. *Computational méthods for data analysis*. 1 vol.,Wiley, New York.

DUBY C., MILLIER C., 1974. *Des différentes utilisations de l'analyse de covariance*. Document provisoire Biométrie, Centre national de Recherches forestières de Nancy, 25 p.

FELS P., TASSENCOURT L., 1973. *Régression multiple progressive*. Département de biométrie et de calcul automatique. Laboratoire de biométrie du C. N. R. Z. Doc. C. N. R. Z. 73/16, 29 p.

FERRARI Th. J., 1966. Towards soil fertility in dimensions. *Neth. J. Agric.*, **14,** 225-238.

GALET P., 1951. Le dosage de calcaire actif et l'appréciation du pouvoir chlorosant des sols. Extrait *Progrès agricole et viticole*, 6 p.

GIGOUT M., MASSON J. P., 1976. *Analyse de covariance multivariable*. Département de Biométrie. Station de biométrie du C. N. R. Z., Document C. N. R. Z. 76/008, 48 p.

GRAS R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône, entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13,** 141-174.

GRAS R., 1975. Climat production et longévité du lavandin. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **61,** 865-869.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques*. 1 vol., Masson, Paris.

HÉNIN S., MONNIER G., 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. *C. R. IV Cong. Intern. Sci. Sol*, Paris, vol. B, 49-52.

JUSTE C., POUGET R., 1972. Appréciation du pouvoir chlorosant des sols par un nouvel indice faisant intervenir le calcaire actif et le fer facilement extractible. Application au choix des porte-greffes de la vigne. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **58,** 352-357.

NELDER J. A. *et al.*, 1973. GENSTAT. *Référence manual*. University of Edinburgh.

TOMASSONE R., 1967. Une méthode d'investigation : La régression orthogonale. *Ann. Sci. Forest.*, **24,** 233-258.

TOMASSONE R., 1976*a*. *Quelques idées générales sur l'analyse multivariate*. Département de biométrie et de calcul automatique. Laboratoire de biométrie du C. N. R. Z. Document C. N. R. Z. 76/04, 48 p.

TOMASSONE R., 1966*b*. *Différentes approches d'un même corpus de données. Application à l'analyse des résultats des élections italiennes*. Département de Biométrie et de calcul automatique. Laboratoire de Biométrie du C. N. R. Z. Document C. N. R. Z. 76/01, 40 p.

TURC L., 1967. Indicences des facteurs microclimatiques sur les productions végétales. Fourrages, **31,** 10-35.

Ann. agron., 1980, **31** (2), 219-238.

Aspects écologiques de la manifestation de la chlorose ferrique en année sèche, chez la vigne, dans les sols calcaires de la moyenne vallée de la Loire

R. MORLAT *, J. DUPONT ** et J. SALETTE *

avec la collaboration technique de G. VENIN et Mme J. ROBICHET

* *Station d'Agronomie,*
Centre de Recherches agronomiques d'Angers, I.N.R.A.,
49000 Angers
** *Laboratoire de Pédologie, Université de Poitiers*

Résumé

Dans les vignobles de la Moyenne Vallée de la Loire (Chinon, Bourgueil, Saumur), les phénomènes de chlorose ferrique sont fréquents, avec pour certains milieux une recrudescence en année sèche. L'étude du potentiel chlorosant des substrats calcaires traduit de grandes variations pour certaines caractéristiques, en particulier pour le fer facilement extractible qui est lié à la teneur en glauconie du matériau. Les sols eux-mêmes présentent des profils pédologiques très différents suivant la position topographique et le degré d'évolution pédogénétique. Sur pentes, des sols jeunes et minces se rencontrent quel que soit le matériau géologique calcaire et entraînent des chloroses classiques d'année humide dont l'intensité dépend de la teneur en fer facilement extractible de chaque horizon. Sur plateaux, replats et bas de pentes, des sols plus évolués se développent et présentent à profondeur variable (60 à 80 cm) un niveau d'accumulation des carbonates, l'horizon Bca, ayant une épaisseur de 5 à 20 cm, très riche en calcaire fin, pauvre en fer facilement extractible, et avec une réserve utile en eau élevée. En période sèche, les conditions d'alimentation hydrique de la Vigne entraînent une exploitation intense de cet horizon par des racines de faible diamètre (< 1 mm). La grande activité racinaire dans un milieu à diffusion difficile (marnes) peut contribuer à une augmentation de la pression de CO_2 favorable à la production d'une grande quantité de bicarbonates. L'ensemble de ces caractéristiques physicochimiques très défavorables jouent un rôle important dans le déclenchement des graves chloroses de la Vigne qui s'observent en année ou période sèches.

Le but de ce travail est de rechercher, par l'analyse d'un certain nombre de situations au champ, les liaisons entre la chlorose ferrique de la Vigne et les caractéristiques climatiques de l'année, en fonction de deux critères essentiels : l'importance du type de profil pédologique, l'influence d'horizons particuliers.

En effet, s'il est classique d'observer dans les vignobles établis sur sols calcaires (Charentes, Champagne, Vallée de la Loire) une recrudescence de chlorose en année pluvieuse, ce qui suggère qu'il y a une relation entre l'humidité du sol et l'intensité de cette maladie physiologique, il existe aussi des chloroses en conditions sèches. Il nous a paru important d'analyser ces problèmes dans les sols calcaires de la Moyenne Vallée de la Loire, présentant plusieurs stades d'évolution pédologique (Dupont, 1978).

Roche-mère	calcaire total %	calcaire actif %	pH eau	FFE :: (ppm)	IPC ::::	Type de chlorose et situations analysées (codes profils pédologiques)								
						Chlorose d'année ou période sèche			Chlorose d'année humide			Sans problèmes chlorose		
						Sol	Code profil	CF/pg [1] [2]	Sol	Code profil	CF/pg	Sol	Code profil	CF/pg
Craie limono-argileuse (Turonien inférieur et moyen)	76,4	23,5	8,6	35	192	Brun calcaire à calcique à Bca	1SAZ 1LIZ 10CRO	SO_4 3309 5BB 41B	Pararendzine à brun calcaire mince	11CRO	5BB	Sol brun calcique épais	2LIZ	3309
Craie sablo-limono-glauconieuse (Turonien moyen)	46,5	18,8	8,7	130	11	-	-	-	-	-	-	Pararendzine à brun calcaire	1REN	3309
Sable glauconieux calcaire (Turonien supérieur)	58,0		8,8			Brun calcaire à Bca et amas discontinu	1CHA	41B	-	-	-	Sols bruns calcaires	2CHA	41B

:: *fer facilement extractible à l'oxalate d'ammonium*
:::: *indice de pouvoir chlorosant (POUGET et JUSTE, 1972)*
[1] *Cabernet franc*
[2] *porte-greffe*

TABLEAU 1

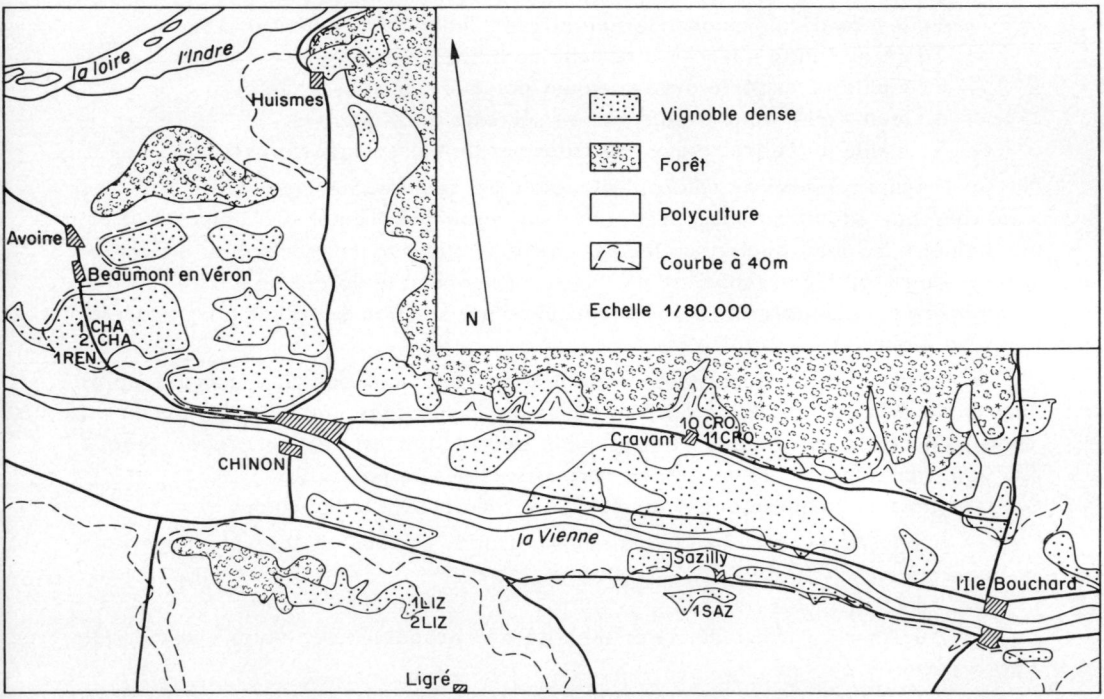
Caractéristiques chimiques moyennes des différentes roches-mères et des diverses situations étudiées

Mean chemical characteristics of various rocks and different experimental plots

I. — Matériel et méthodes

Pour cette étude, nous avons choisi huit parcelles caractéristiques (cf. tabl. 1 et carte 1) :

- Quatre répétitions correspondant à des chloroses d'année sèche (1CHA, 1SAZ, 1LIZ, 10CRO).
- Quatre répétitions de sols peu ou non chlorosants en année sèche (2CHA, 2LIZ, 11CRO, 1REN).



CARTE 1

Situation des parcelles étudiées dans le vignoble du Chinon.
Situation of plots in the vineyard of the Chinon area.

Ces parcelles permettent de comparer le système porte-greffe-greffon en sol chlorosant d'année sèche et en sol non ou peu chlorosant d'année sèche.

Pour chaque sol étudié, une ou plusieurs fosses pédologiques ont été creusées. La description de profil a été effectuée à l'aide du glossaire de Pédologie. Les analyses physico-chimiques classiques ont été faites sur les différents horizons. Certaines observations particulières ont été poursuivies périodiquement en cours de végétation durant l'année 1976 :

- Détermination de bicarbonates extractibles à l'eau exempte de CO_2, (HCO_3^-EE) selon la méthode décrite par Boxma (1972), Patel *et al.* (1977), Schinas et Rowell (1977),

sur terre humide, avec un rapport d'extraction de 1/10, un temps de contact de 1/4 d'heure et une agitation rotative de 40 t/min. Après filtration sur büchner, le dosage est réalisé soit par titration avec H_2SO_4 N/50 avec le méthyl orange comme indicateur, soit par enregistrement continu de la courbe de pH avec titration sur un ensemble pH-mètre enregistreur potentiométrique. Pour chaque échantillon dosé, deux répétitions sont effectuées.

- Etude des profils hydriques à l'aide d'une sonde à neutrons type CEA SOLO.
- Notation des symptômes de chlorose sur le feuillage en appliquant une échelle allant de 0 à 5 :

— 0 : feuilles vertes avec absence de tout symptôme de chlorose,
— 1 : légère décoloration internervaire du limbe,
— 2 : décoloration internervaire nette du limbe,
— 3 : feuille jaunissante avec quelques points de nécrose,
— 4 : feuille très jaune avec début de nécroses périlimbaires,
— 5 : feuille jaune ivoire avec nécroses périlimbaires importantes.

- Teneurs relatives en chlorophylle totale des feuilles. Sur chacun des huit ceps contrôlés par situation, nous prélevons huit disques de limbe à l'emporte-pièce, de diamètre 5,5 mm (quatre sur feuilles âgées, quatre sur jeunes feuilles, de part et d'autre du rang). L'extraction est effectuée à l'acétone et le dosage se fait au spectrophotomètre par comparaison à un témoin qui est une solution de vert de bromonaphtol dans l'acétone.
- Caractérisation du système racinaire par une méthode destructive : après une étude de population portant sur au moins trente ceps, un individu moyen est choisi, une fosse est creusée et l'ensemble des racines est récupéré pour chaque horizon. Après lavages et triages, les racines sont pesées par classe.

Les classes retenues pour le diamètre des racines sont les suivantes :

— *inférieur à* 1 *mm* : chevelu racinaire à grande efficacité d'absorption hydrique et minérale,
— 1 *à* 2 *mm* : fines radicelles,
— 2 *à* 5 *mm* : racines déjà très subérisées et propablement moins actives pour l'absorption,
— 5 *à* 10 *mm* : racines charpentières très subérisées,
— *sup. à* 10 *mm* : grosses racines assurant l'ancrage du porte-greffe.

L'expression des résultats concernant l'enracinement est faite en utilisant une transformation isovolumique, ceci pour éliminer l'effet épaisseur des horizons. L'axe OZ des profondeurs sur les graphiques sera donc sans dimensions.

II. — Description pédologique des milieux étudiés

A. — *Les types de sols*

1. *Les roches-mères et la situation des parcelles.*

Les huit parcelles sont situées sur des substrats calcaires fort différents parmi lesquels nous distinguons (tabl. 1) :

- *Les craies du Turonien inférieur*, de texture limono-argileuse, qui donnent

naissance à une gamme de sols allant de la rendzine grise au sol brun calcique. Le faciès limono-argileux des craies du Turonien moyen donne la même séquence.

- *Les craies du Turonien moyen*, de texture sablo-limoneuse et glauconieuses, avec une gamme allant de la pararendzine au sol brun calcique argilisé.

- *Enfin les sables calcaires glauconieux* calcaires à aspect falunier, et les marnes plus ou moins consolidées sur Turonien supérieur.

Il est intéressant dans un premier temps de mettre en évidence un certain nombre de caractéristiques chimiques intervenant dans le potentiel chlorosant de ces différentes roches-mères (tabl. 1). Nous observons de grandes variations pour certains facteurs. C'est le cas du calcaire total qui peut passer de 37 p. 100 à 76,4 p. 100. De même, le fer facilement extractible à l'oxalate d'ammonium (FFE) accuse de grandes variations, avec un minimum pour la craie limono-argileuse et un maximum dans les formations glauconieuses. Nous avons d'ailleurs pu mettre en évidence, sur quarante échantillons provenant de situations différentes, deux relations statistiques entre la teneur en glauconie (G p. 1000) de la roche-mère, estimée par pesée après triage magnétique, et celle en fer facilement extractible (FFE).

- $y = 13{,}71\ x^{0{,}422}$ (*)
  pour le Turonien supérieur : $r = 0{,}807$ ($p < 0{,}01$) $n = 17$
- $y = 38{,}44\ x^{0{,}328}$
  pour le Turonien inférieur et moyen : $r = 0{,}751$ ($p < 0{,}01$) $n = 22$.

Les teneurs en calcaire actif sont assez voisines quel que soit le type de roche ou le pH. On voit donc que déjà les roches-mères ont un potentiel chlorosant, qui peut s'exprimer partiellement par l'indice de pouvoir chlorosant (IPC), très différent selon leur nature

$$IPC = \frac{[CaCO_3 \text{ actif}]\ p.\ 100}{[FFE]^2} \times 10^4 \text{ (selon Pouget et Juste, 1972)}.$$

2. *Les sols.*

Ces différentes roches-mères engendrent des sols pouvant se rattacher à trois orthotypes principaux pour lesquels nous donnons les caractéristiques physicochimiques (tabl. 2) :

- Les pararendzines et bruns calcaires sur craie sablo-limoneuse et glauconieuse du Turonien moyen qui ont une texture à dominante sableuse et une répartition des carbonates présentant un maximum dans la classe des sables.

- Les rendzines grises et sols bruns calcaires minces sur craie limonoargileuse bien pourvus en calcaire total (Turonien inférieur).

- Les sols bruns calcaires à horizons d'accumulation de carbonates (Bca) sur craie limono-argileuse dont la texture devient plus fine, particulièrement dans l'horizon d'accumulation de carbonates.

Le taux de calcaire total augmente lorsque l'on passe des pararendzines (37 p. 100) aux sols bruns calcaires : horizon Bca (50 p. 100), alors que la variation des teneurs en calcaire actif pour la plupart des horizons montre une légère diminution.

(*) $y = [FFE]$ en ppm,
$x = (G)$ en p. 1 000.

Code profil	Type de sol	Horizon prof. en cm	Argile %	M.O. %	pH	Ca CO_3 total %	Ca CO_3 actif %	FFE ppm	IPC	Réserve utile en eau mm
1REN	Pararendzine à sol brun calcaire sur craie sablo-glauconieuse (Turonien moyen)	Ap 0-30	12,5	1,02	8,2	36,4	13,0	101	12	36
		A/C 30-50	26,4	0,98	8,2	37,5	18,7	143	9	32
		C > 50	17,4	0,24	8,4	75,4	18,7	171	6	-
11CRO	Sol brun calcaire mince à rendzine sur craie limono-argileuse (Turonien inférieur et moyen)	Ap 0-18	13,5	1,74	8,2	49,2	14,7	40	91	22,5
		(B) A/C 18-33	14,6	1,67	8,1	48,3	15,9	34	137	13
		C > 33	8,9	0,15	8,6	85,7	28,4	39	187	-
10CRO	Sol brun calcaire à Bca sur craie limono-argileuse (Turonien inférieur et moyen)	Ap 0-35	17,5	1,57	8,1	51,3	12,0	39	79	19
		(B) 35-50	18,6	0,17	8,3	50,6	14,0	38	97	17,5
		Bca 50-70	32,1	0,87	8,4	85,7	49,1	35	401	63
		C > 70	6,4	0,10	8,7	77,0	31,2	42	177	-
1CHA	Sol brun calcaire avec Bca en vénules sur sables glauconieux et calcaires du Turonien dupérieur	Ap 0-20	9,2	1,31	8,1	31,8	5,0	51	19	4,9
		(B) 20-35	10,3	0,58	8,3	30,5	6,6	41	39	4,1
		B/C 35-70	5,3	0,15	8,6	41,9	5,7	50	23	1,7
		C 70-120	8,6	0,16	8,5	58,0	10,0	49	42	8,5
		Bca en vénules 50-120	18,3	0,68	8,1	70,6	37,2	51	143	23,5
2CHA	Sol brun calcaire mince sur sables glauconieux et calcaire du Turonien supérieur	Ap 0-20	8,5	1,34	8,4	28,5	6,5	47	29	4,3
		(B) 20-40	11,4	0,35	8,4	29,5	6,6	51	25	5,0
		C > 40	8,9	0,12	8,6	44,0	12,5	88	16	8,4

TABLEAU 2

Caractéristiques physico-chimiques des principaux profils de l'étude
(résultats exprimés par rapport à la terre séchée à 105 °C)

Physical and chemical characteristics of the main soils

Pour le fer facilement extractible les teneurs différencient nettement la pararendzine des autres sols.

3. *Originalité de l'horizon Bca.*

Un horizon se distingue par ses caractéristiques physico-chimiques, c'est l'horizon d'accumulation de carbonates (ou Bca) des sols bruns calcaires sur craie limono-argileuse :

- On constate à ce niveau une très nette augmentation des teneurs en argile et en calcaire total. Cela est encore plus sensible pour le calcaire actif qui passe de 13 p. 100 en moyenne dans les horizons de surface à 49 p. 100 dans l'horizon Bca, alors que, parallèlement, le fer facilement extractible a tendance à diminuer.

- Cet horizon présente donc des caractéristiques très chlorosantes. Par ailleurs la teneur en éléments fertilisants à ce niveau est très faible. Par contre, la teneur en

matière organique peut y atteindre 1 p. 100 et est à mettre en relation avec un enracinement abondant.

• Enfin ce type d'horizon se distingue par une réserve utile en eau élevée qui aura une importance toute particulière en période sèche.

B. — *Origine et situation morphologique des horizons d'accumulation de carbonates : Bca*

Le calcaire dans le sol peut migrer sous deux formes principales :

— soluble, par l'intermédiaire du bicarbonate de calcium d'après l'équation d'équilibre suivante :

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftarrows Ca(HCO_3)_2 ;$$

— solide, des particules pouvant être entraînées mécaniquement par l'eau.

Dans notre région il semble y avoir deux voies de génèse possibles selon le type de matériau calcaire, à partir d'un stade unique (fig. 1). Le matériau calcaire correspond à un sol jeune où l'on peut remarquer des concentrations de calcaire de lessivage sous forme de pseudomycélium (filaments blanchâtres) dans l'horizon d'altération. Ce stade n'entraînant pas de différenciation morphologique et physicochimique nette, n'est pas favorable à l'apparition de la chlorose d'année sèche :

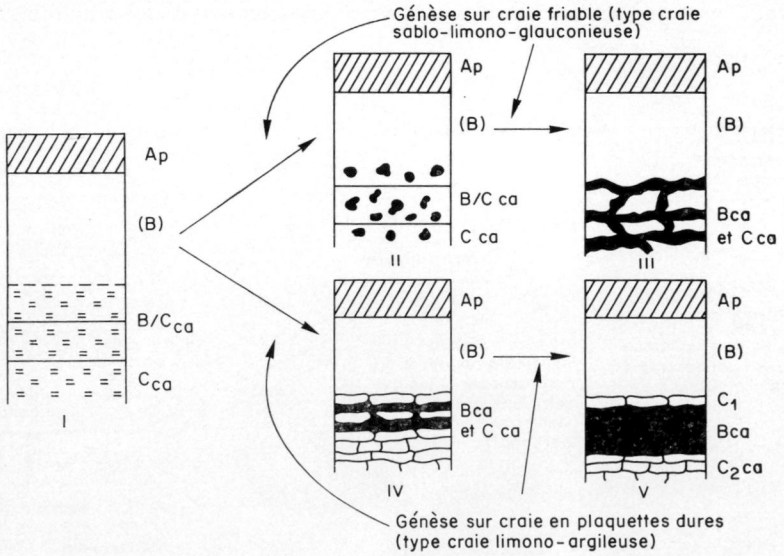


FIG. 1. — *Les différents stades d'évolution morphologique des horizons Bca sur les matériaux crayeux dans le vignoble de la Moyenne Vallée de la Loire.*

Horizon enrichi et matière organique
Pseudomycélium calcaire
Bca en amas friable
Bca anastomosé
Bca en horizon continu relativement épais

Different stages of the morphological evolution of Bca layers on various chalks in the vineyard of the medium valley of Loire.

• *Génèse sur matériau calcaire friable* (type craie sablo-glauconieuse, sable glaucono-calcaire, sable falunier, marne calcareuse). Le stade pseudomycélium (I) évolue vers l'horizon Bca discontinu en amas friable (II) pouvant être exploité par les racines. La texture devient argilo-limoneuse à argileuse. Enfin le stade ultime correspond à l'horizon Bca continu de couleur rosée très exploité par les racines, mais toujours de faible épaisseur (4 à 5 cm) constituant un véritable réseau anastomosé (III).

• *Génèse sur matériau crayeux dur* (type craie limono-argileuse). Le stade pseudomycélium (I) engendre un début de formation d'horizon Bca caractérisé par un recouvrement pelliculaire (IV) de la face inférieure des plaquettes de craie. Ensuite cette pellicule s'épaissit pour donner un véritable horizon d'accumulation de carbonates pouvant atteindre 15 à 20 cm (V), de couleur rosée, de texture argileuse et très colonisé par les racines de Vigne. Il en résulte que cet horizon est placé très souvent entre un premier niveau mince de plaquettes crayeuses disloquées et la roche-mère sous-jacente.

• *Situation morphologique des horizons Bca*

— sur roche-mère calcaire tendre il ne semble pas y avoir de situation caractéristique d'un stade privilégié,

— sur matériau calcaire dur, par contre, nous trouvons des situations typiques (fig. 2) :

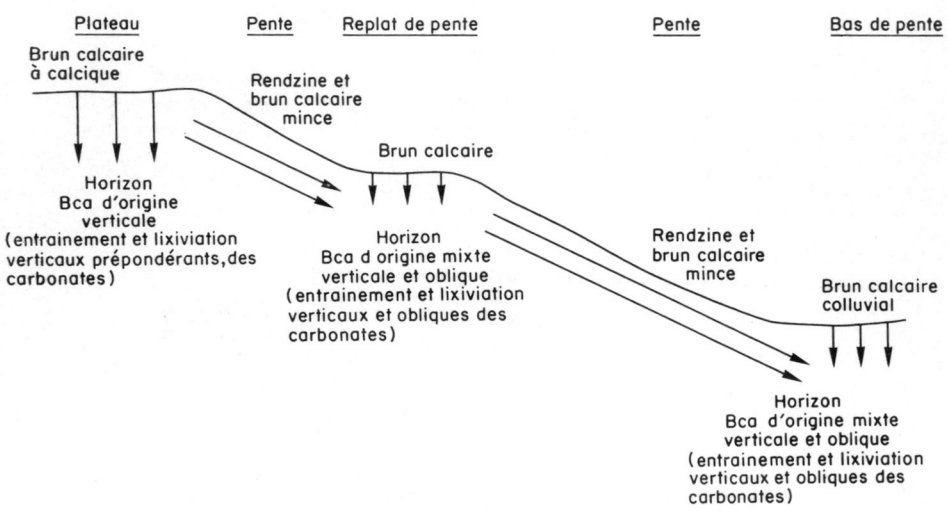


FIG. 2. — *Situation morphologique et mécanismes prépondérants de génèse des horizons d'accumulation de carbonates* (Bca) *dans la Moyenne Vallée de la Loire.*

Morphological situation and main mechanisme of the genesis of carbonate accumulation horizons (Bca) *in the medium Loire Valley area.*

• dans les pentes, seuls les stades I et II se rencontrent,

• en situation plane, l'horizon Bca se développe à la base d'un sol brun calcique et par entraînement vertical de carbonates,

- en bas de pente ou sur replat morphologique de pente, nous trouvons des horizons d'accumulation de carbonates épais et pouvant avoir une double origine : entraînement vertical, entraînement oblique.

III. — Relations sol-plante

A. — *Systèmes racinaires*

Les sols bruns calcaires à horizon Bca présentent donc un horizon d'accumulation de carbonates ayant des caractéristiques chimiques très défavorables, mais une réserve hydrique importante. Il est intéressant d'étudier la répartition du système racinaire pour savoir si une fraction importante colonise cet horizon.

Les figures 3 et 4 traduisent la proportion pondérale des différentes classes de racines.

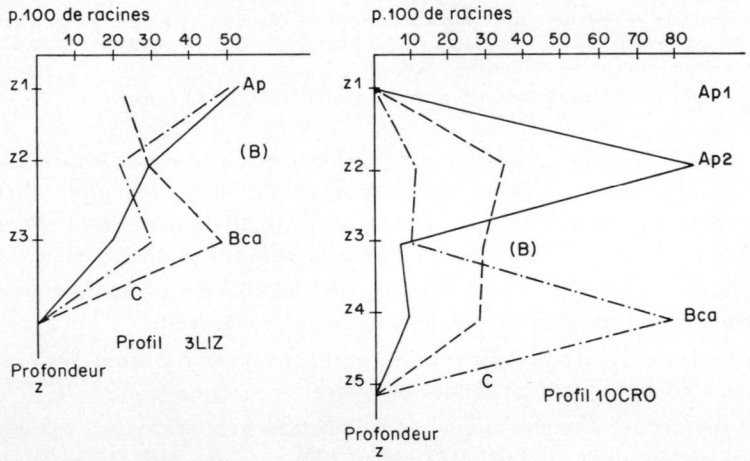


FIG. 3. — *Pourcentages pondéraux de chaque classe de racines selon les horizons* (à partir de données isovolumiques). —— diamètre > 2 mm, — — — entre 2 et 1 mm, —•—•— diamètre < 1 mm. Profil 3LiZ : Sol brun calcaire à Bca sur Turonien inférieur. Profil 10CRO : sol brun calcaire à Bca sur Turonien moyen.

Weight percentages of each division of roots (isovolumic data) *for each horizon*

Pour l'ensemble des classes de diamètre de racines supérieur à 2 mm, le pourcentage de racines diminue avec la profondeur, sauf pour le profil 10CRO où nous observons un pic très net dans l'horizon Ap_2. Notons que dans l'horizon Bca, il reste encore respectivement près de 20 p. 100 du poids total des racines correspondant aux classes de diamètre supérieur à 2 mm dans le profil 3LIZ et 10 p. 100 dans le 10CRO. En ce qui concerne les racines de diamètre compris entre 1 et 2 mm, il y a maintien ou même augmentation du pourcentage dans l'horizon Bca par rapport à l'horizon (B). Mais l'évolution de la classe de diamètre inférieur à 1 mm est la plus intéressante : en effet, il existe un pic très net, au niveau de l'horizon Bca, pouvant atteindre 80 p. 100 pour le profil 10CRO.

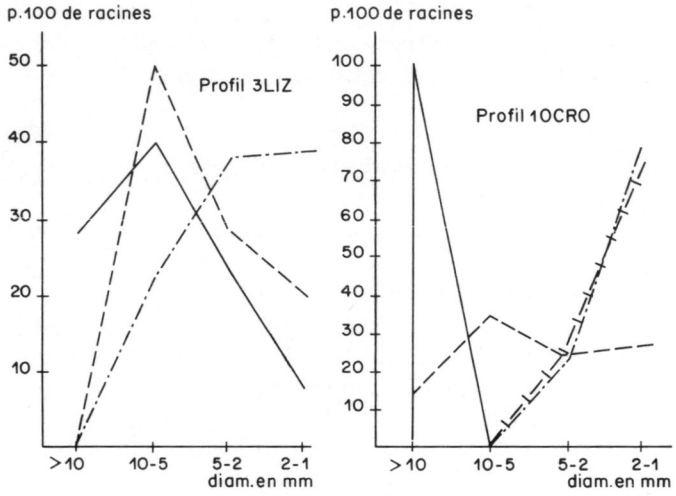


FIG. 4. — *Importance relative en pourcentages pondéraux de chaque classe de diamètre de racines pour chaque horizon.* Profil 10CRO : Horizons : —— Ap_1, —— Ap_2, —·— (B), —|— Bca. Profil 3LiZ Horizons : —— Ap, —— (B), —·—· Bca.

Weight percentages of each division of roots for each horizon.

Cela montre l'intense colonisation de cet horizon surtout par les racines les plus fines. Nous pouvons encore examiner les courbes (fig. 4) qui traduisent l'importance relative en pourcentage pondéraux de chaque classe de diamètre de racines pour un horizon donné. Deux grands groupes d'horizons peuvent se différencier :

- les horizons de surface (Ap) pour lesquels les courbes présentent un maximum dans les classes de gros diamètre, puis une décroissance nette,
- les horizons de profondeur (Bca en particulier) pour lesquels les courbes sont en croissance continue vers les faibles diamètres.

Il faut remarquer également que, dans l'horizon Bca, la classe 2 à 5 mm est bien représentée surtout dans le profil 3LIZ (40 p. 100) et même celle de 5 à 10 mm (23 p. 100). Il y a donc dans cet horizon d'accumulation de carbonates, un système racinaire structuré avec plusieurs classes de diamètre de racines, ce qui peut traduire un établissement permanent, avec certainement une durée de vie très courte des racines les plus actives (diamètre inférieur à 1 mm). Il est indéniable que ce type de système racinaire soit lié aux conditions et aux possibilités d'alimentation hydrique dans ces sols.

a) *Comportement lié à l'alimentation hydrique-rôle de l'horizon Bca.*

Si nous étudions l'alimentation hydrique de la Vigne dans un sol brun calcaire mince et dans un sol brun calcaire à horizon Bca, nous pouvons remarquer :

— dans le premier cas (fig. 5), un très fort dessèchement des horizons Ap et A/C s'observe entre le 31 mars et le 8 septembre 1976 puisque l'humidité volumique chute de 20 p. 100 à environ 3 p. 100, le dessèchement ayant largement dépassé pF 4,2. La contribution de la partie supérieure de la craie a été également importante, mais le dessèchement n'a pas atteint pF 4,2 ;

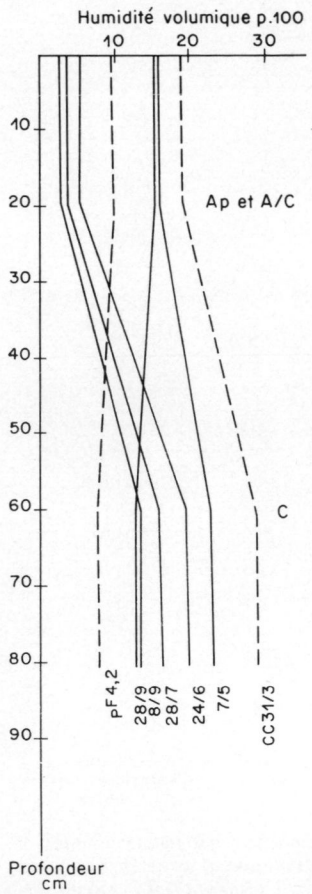


FiG. 5

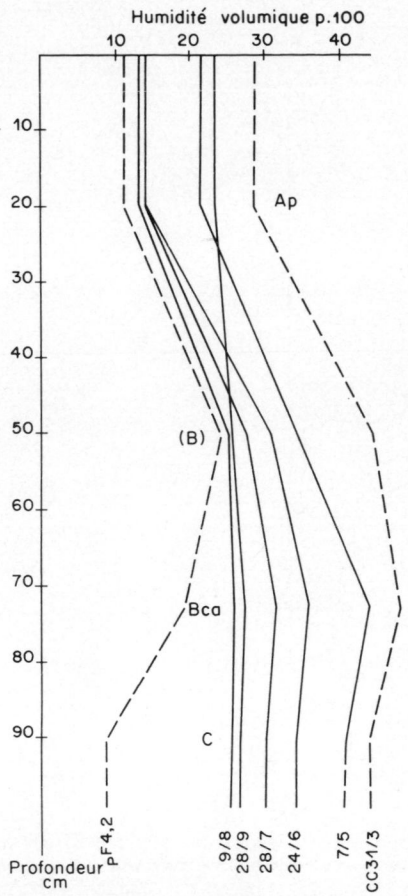


FIG. 6

FIG. 5. — *Profil peu chlorosant* (11CRO). Sol brun calcaire mince sur craie limono-argileuse.

FIG. 6. — *Profil très chlorosant* (10CRO). Sol brun calcaire à Bca sur craie limono-argileuse.

Evolution des profils hydriques pour des sols peu chlorosants (11CRO) et très chlorosants (10CRO) en année sèche (1976).

Water content variations of soils with a lower iron chlorosis potential (11CRO ; fig. 5) and high iron chlorosis potential (10CRO ; fig. 6) for a dry year (1976).

— dans le second cas (fig. 6), nous remarquons que l'horizon Bca a contribué largement à l'alimentation hydrique de la Vigne puisque son humidité volumique est passée de 45 p. 100 au 31 mars à 20 p. 100 au 28 septembre, atteignant presque pF 4,2. Par contre la contribution de la craie est beaucoup moins importante que dans le sol mince. Notons enfin que le dessèchement des horizons Ap et (B) n'a pas atteint pF 4,2 contrairement au premier cas.

D'après l'étude, nous pouvons commenter des courbes de dessèchement typiques en relation avec l'apparition de la chlorose ferrique pour l'année 1976 (fig. 7).

La courbe 1 correspond aux horizons de surface (Ap) des sols bruns calcaires à accumulation de carbonates de profondeur, qui se dessèchent très rapidement dès le

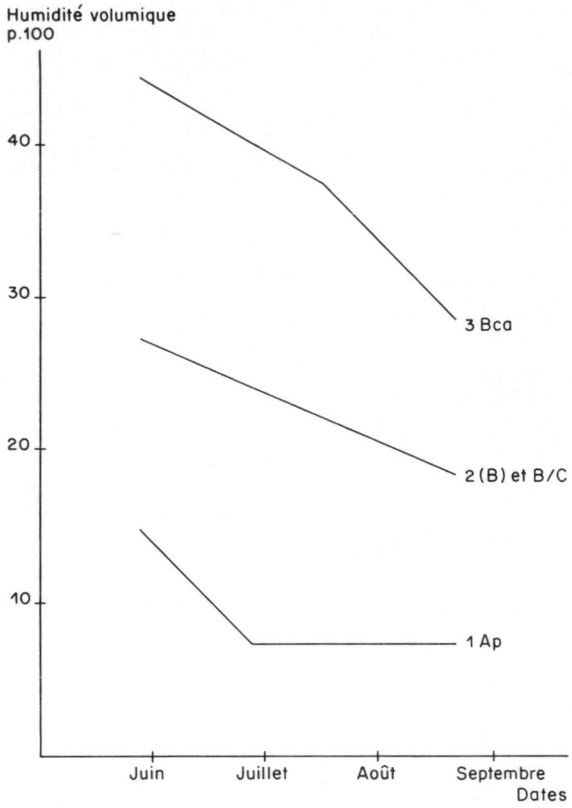


FIG. 7. — *Courbes schématiques de déssèchement des principaux horizons rencontrés en sols calcaires comportant au moins un horizon à pouvoir chlorosant élevé* (année sèche 1976).

- Bca : fort pouvoir chlorosant pour Cabernet franc/5 BB, SO_4 et 41 B.
- (B) et B/C : faible à très faible pouvoir chlorosant pour Cabernet franc/5 BB, SO_4 et 41 B.
- Ap : non chlorosant à très faible pouvoir chlorosant pour cabernet franc/5 BB, SO_4 et 41 B.

Schematic drying curves of main horizons on calcareous soils presenting one or several layers with a strong iron chlorosis potential.

mois de juin, pour atteindre une humidité qui est inférieure au point de flétrissement mesuré en laboratoire (pF 4,2) et qui reste constante pendant toute la période sèche. Notons que ces horizons présentent le pouvoir chlorosant le plus faible du profil.

La courbe 2 intéresse les horizons (B) et B/C qui se situent au-dessus des horizons Bca et traduit un dessèchement régulier au cours de la période végétative de la Vigne.

Plus intéressante est la courbe 3 qui représente l'évolution de l'humidité de l'horizon Bca du profil. Jusqu'au mois de juillet le dessèchement est progressif et s'accentue à partir de la mi-juillet. Entre juillet et septembre, une grande partie de l'alimentation hydrique de la Vigne a été assurée par cet horizon à pouvoir chlorosant très élevé. Notons qu'en année à printemps et début d'été humide (1977), l'alimentation hydrique de la Vigne est surtout assurée par les horizons de surface, Ap, à pouvoir chlorosant relativement faible et, dans ce cas, les symptômes de chlorose ferrique de la Vigne sont beaucoup moins accusés qu'en année sèche (Dupont *et al.*, 1978). Ce

comportement pourrait conduire à formuler l'hypothèse d'un fonctionnement différentiel de certaines parties du système radiculaire de la Vigne, en relation avec les possibilités d'alimentation hydrique.

b) *Rôle de la concentration en bicarbonates du sol.*

L'indice de pouvoir chlorosant montre que l'horizon Bca est beaucoup plus défavorable que l'ensemble des autres horizons, y compris la craie dure ; mais il semble logique que ce niveau très riche en calcaire fin, offrant de grandes surfaces de dissolution des carbonates et qui comporte une activité racinaire forte en période de végétation entraînant une augmentation du taux de CO_2, constitue un milieu dans lequel la quantité de bicarbonate de calcium est élevée.

Or, il a été montré par plusieurs auteurs (Baxter et Belcher, 1955 ; Brown, 1960 ; Brown *et al.*, 1959 ; Boxma, 1972 ; Miller *et al.*, 1960 ; Rutland *et al.*, 1971 ; Petersen, 1964 ; Porter et Thorne, 1955) que HCO_3^- est un des facteurs importants de l'apparition de la chlorose ferrique.

D'après la réaction d'équilibre suivante :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftarrows Ca^{++} + 2\,HCO_3^-\,,$$

nous voyons que la teneur en HCO_3^- sera dépendante à la fois de la teneur en eau et du taux de CO_2 du milieu pour une même quantité de carbonate de calcium. La quantité de HCO_3^- serait donc maximum lorsque les taux d'humidité et de CO_2 du sol seraient eux-mêmes maxima.

Nous avons donc essayé de mettre en évidence les relations qui peuvent exister entre les variables HCO_3^-, teneur en eau, et pression partielle de CO_2 pour les différents milieux étudiés (horizons pédologiques). Ensuite nous avons tenté de relier les fluctuations de ces variables avec l'évolution de la teneur en chlorophylle des feuilles de Vigne. En ce qui concerne la pression partielle de CO_2, en l'absence de mesure, nous ne pouvons que formuler des hypothèses (cf. tabl. 3) en nous appuyant sur la densité radiculaire et son activité (alimentation hydrique). Pour la variable bicarbonates, bien que surestimant la teneur réelle en HCO_3^- de la solution du sol (Adams, 1971 ; Reitemhier, 1945), le taux d'HCO_3^- extractible à l'eau (HCO_3^-EE) nous a permis d'effectuer des comparaisons intéressantes entre horizons. Le taux moyen annuel d'HCO_3^-EE (moyenne des mesures de mai à octobre) différencie nettement les horizons Bca des horizons (B) et des craies sous-jacentes des profils étudiés. Un seuil peut s'inscrire vers 450 ppm, au-dessus duquel se placent les horizons Bca (fig. 8).

Au cours de la période de végétation de la Vigne (mai à octobre), le taux d'HCO_3^-EE (moyenne de trois répétitions) dans les horizons Bca, augmente de façon très nette de début mai jusqu'à fin mai (teneur supérieure à 1 000 ppm), puis subit une diminution très importante au début de l'été pour fluctuer entre 500 et 600 ppm jusqu'en septembre. Dans les horizons A/C (niveaux de transition entre le sol proprement dit et la roche mère crayeuse) l'allure de la courbe se rapproche de celle concernant les horizons Bca, mais avec des teneurs en HCO_3^-EE plus faibles. Pour les horizons (B) des sols non chlorosants d'années ou de période sèches, le taux de HCO_3^-EE est relativement constant au cours de la période végétative et se situe entre 450 et 500 ppm. Pour expliquer l'allure de la courbe concernant le taux de HCO_3^- des horizons Bca en année sèche (1976), nous pouvons avancer l'hypothèse suivante :

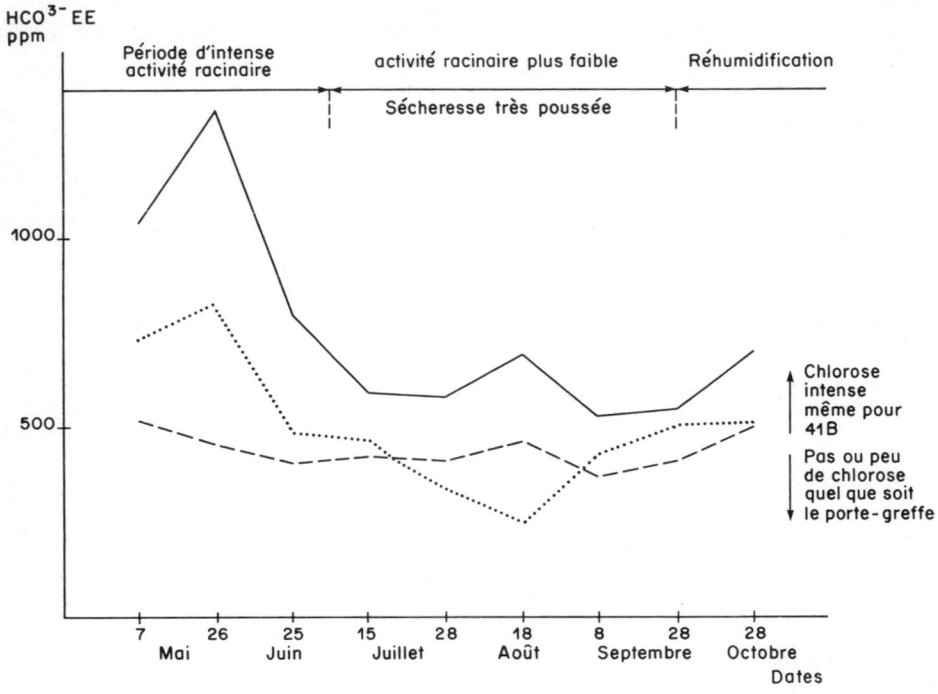


FIG. 8. — *Evolution saisonnière du taux de HCO_3^-EE estractible à l'eau pour une année sèche* (1976), *dans différents horizons pédologiques des sols étudiés.* Horizons : Bca sols chlorosants en année sèche ——; (B) sols non chlorosants en année sèche — — ; A/C friable, colonisé par l'enracinement en sol calcaire mince... (sol brun calcaire).

Seasonal evolution of HCO_3^-EE (water extract) *content for a dry year* (1976) *on some pedological calcareous horizons.*

Pendant le printemps l'activité racinaire est élevée (à cause des fortes réserves hydriques disponibles du milieu) et pourrait entraîner, grâce à des échanges respiratoires intenses, une augmentation de la teneur en gaz carbonique de ces horizons. Les transformations de la matière organique (minéralisation rapide, minéralisation lente) provenant des débris de racines très abondants à ce niveau pourraient aussi accentuer le phénomène. Cela aurait pour conséquence d'augmenter la quantité de carbonate de calcium susceptible d'être dissout dans la solution du sol sous forme de bicarbonates de calcium. Puis en fonction de l'assèchement progressif des horizons Bca au cours de l'été, la variable teneur en eau deviendrait le facteur limitant de la quantité d'HCO_3^-EE. Si nous considérons la relation qui unit le taux d'humidité d'un horizon calcaire à sa teneur en HCO_3^-EE, nous pouvons faire un double classement (tabl. 3) : en fonction de la saison pour un même horizon de sol calcaire, et selon le type d'horizon considéré pour une même saison. Sur la figure 9, nous avons représenté les droites de régression (HCO_3^-EE, humidité volumique) relatives aux familles diverses d'horizons correspondant au tableau 3. Quatre grands types de droites significativement différentes entre elles ont pu être mis en évidence :

Types de sols	Saisons	Horizons pédologiques	Existence de la droite de régression		b	dl (3)	Pente de la droite de régression (fig. 9)	Activité racinaire	P CO_2 supposée	N° droite de regres Fig. 9
			F (1)	F théor. 1 %						
Ensemble des sols étudiés	Automne Hiver	Ensemble des horizons calcaires étudiés	13,33(2)	7,33	1,34	39	4,92 ± 2,73 a	faible	faible	1
Sols bruns calcaires minces à rendzine ; bruns calcaires à Bca craie limono-arg.	Fin de printemps, été	Horizons crayeux peu exploités et Bca asséchés	32,70(2)	7,36	1,93	31	11,08 ± 3,94 b	faible à modéré	relativement faible	2
Sols bruns calcaires à Bca sur craie limono-argileuse	Printemps, début été	Bca très exploités par les racines	97,65(2)	9,63	3,33	11	32,96 ± 7,33 c	forte	élevée	3
Sols bruns calcaires minces sur craie limono-argileuse	Printemps début été	Horizons crayeux friables exploités par les racines	39,17(2)	8,18	5,51	10	34,53 ± 11,52 c	forte	élevée	4

1 : S^2 régression / S^2 résiduelle (3): degré de liberté
2 · hautement significatif a # b # c

TABLEAU 3

Analyse des relations HCO_3^-EE, teneur en eau dans les horizons calcaires étudiés
HCO_3^-EE, water content relationships for main calcareous horizons

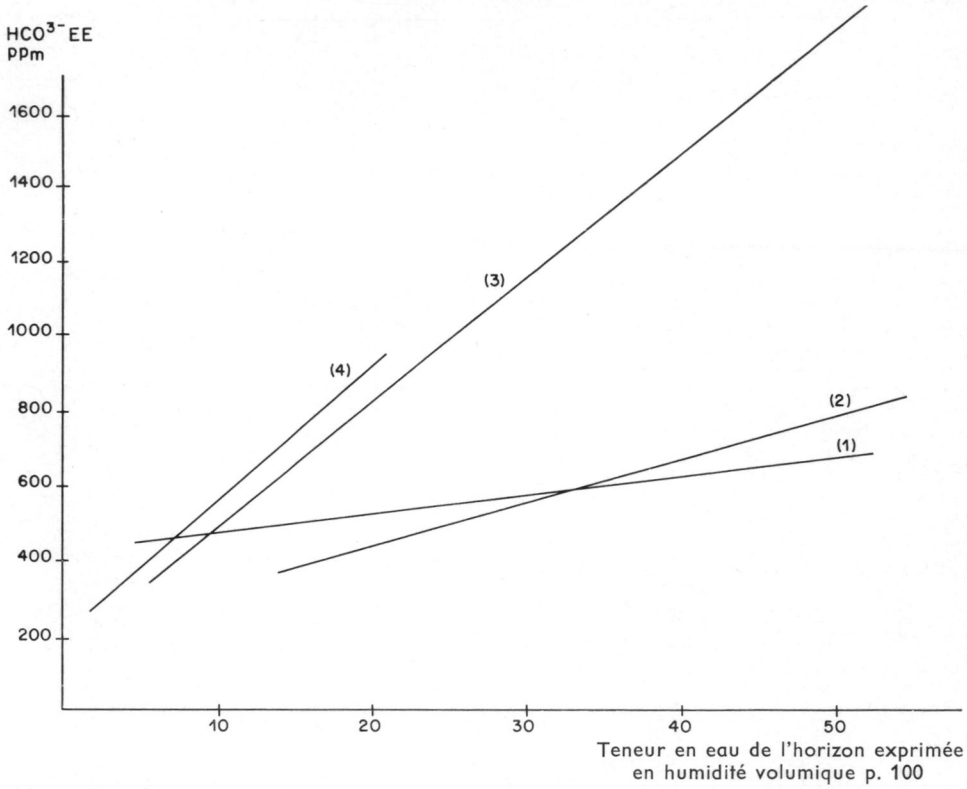


FIG. 9. — *Relations HCO_3^-EE, teneur en eau dans les sols calcaires étudiés* (cf. tabl. 3).

1 : y = 4,92 x + 418,97 (r = 0,511***, n = 40),
2 : y = 11,08 x + 219,29 (r = 0,716***, n = 32),
3 : y = 32,96 x + 155,41 (r = 0,948***, n = 12),
4 : y = 34,53 x + 212 (r = 0,821***, n = 11).

HCO_3^-EE, water content relationships in studied calcareous soils.

La droite 1 regroupant l'ensemble des horizons étudiés (sols calcaires chlorosants et non chlorosants d'année sèche), et qui correspond à des mesures faites en automne et hiver 1976, présente une pente faible.

Les droites 3 et 4 représentant les liaisons HCO_3^-EE et teneur en eau pour les horizons d'accumulation de carbonates (Bca) et les horizons A/C friables colonisés par les racines, sont relatives aux mesures effectuées pendant la période de végétation maximale de la Vigne (printemps et début été) en 1976 et ont des pentes beaucoup plus fortes que la droite 1.

La droite 2 comportant des horizons C de craie non exploités par les racines et des horizons Bca très colonisés par les racines mais asséchés, et qui correspond aux mesures faites à la fin du printemps et en été, présente une pente qui se rapproche de celle de la droite 1.

Ces différences de pente des droites concernant la liaison HCO_3^-EE, teneur en eau, pourraient représenter, d'une certaine manière, l'influence d'un ou de plusieurs

autres facteurs sur la teneur en HCO_3^-EE d'un horizon calcaire. Nous pensons tout particulièrement à la pression de gaz carbonique du milieu (liée à l'activité racinaire et à la minéralisation de la matière organique) et également au facteur température.

c) *Relations avec les symptômes de chlorose ferrique de la Vigne.*

Si nous considérons la figure 10 traduisant l'évolution de la teneur en chlorophylle des feuilles, nous voyons que pour le Cabernet franc greffé sur Téléki 5BB en sol à

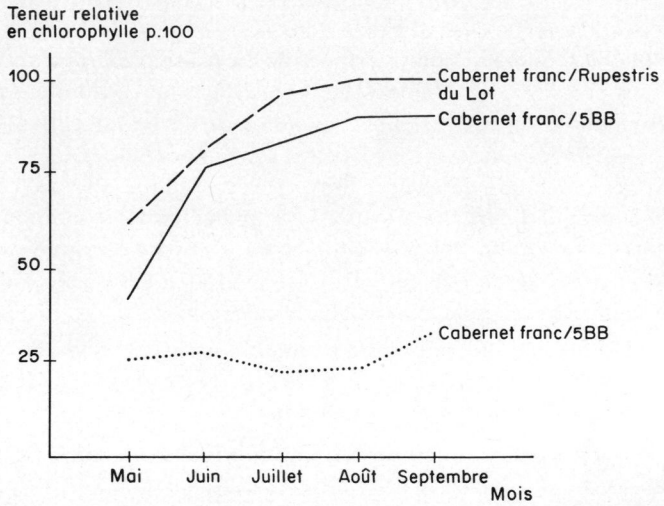


FIG. 10. — *Evolution des teneurs relatives en chlorophylle des feuilles au cours de la période de végétation pour une année sèche* (1976). .... Sol brun calcaire à Bca sur craie limono-argileuse. —— Sol brun calcaire mince sur craie limono-argileuse. ——— Pararendzine sur craie sablo-limono-glauconieuse.

Evolution of relative chlorophyll content of leaves for a dry year (1976).

horizon Bca, les valeurs sont très basses au cours du printemps et de l'été (inférieures à 30 p. 100) (stades 4 de la notation visuelle) avec une légère augmentation en septembre, pouvant correspondre à une alimentation hydrique préférentielle de la Vigne dans les horizons A et (B) ayant été réhumidifiés et beaucoup moins chlorosants que les horizons Bca. Pour la même association greffon-porte-greffe, en sol calcaire mince sans horizon Bca, nous enregistrons des valeurs en chlorophylle comprises entre 50 p. 100 du témoin vert de bromonaphtol au printemps et 90 p. 100 du témoin à la fin de l'été. Si nous comparons la courbe des teneurs en chlorophylle de cette situation à celle du témoin non chlorosant pris sur pararendzine (craie sablo-glauconieuse) avec association Cabernet franc/Rupestris du Lot, nous constatons qu'à partir de juin, il y a un palier assez net dans le premier cas, qui pourrait correspondre à l'augmentation du taux de bicarbonates ayant pu déclencher une chlorose diffuse et passagère.

Il faut remarquer que, pour une même association greffon-porte-greffe (exemple Cabernet franc/Téléki 5BB), la chlorose est très réduite ou inexistante en sol calcaire mince en année sèche pour un IPC moyen de 90 en surface, pourtant bien supérieur

au plafond de résistance (IPC = 40) du 5BB défini par l'échelle de Pouget et Juste (1972), alors qu'elle est très grave en année humide (1977). Il conviendrait donc de moduler les données de l'IPC, en fonction de la pluviométrie, du type d'alimentation hydrique de la Vigne et des conditions de profil pédologique, sauf dans le cas des sols où le taux de FFE est supérieur à 60 ppm.

Conclusion

Il apparaît à la suite de cette étude que les phénomènes de chlorose ferrique d'année ou de période sèche chez la Vigne dans notre région dépendent, par l'importance des conditions d'alimentation hydrique, de la présence à profondeur variable (60 à 80 cm) dans certains sols, d'un niveau à caractéristiques chimiques très défavorables qui correspond à un horizon d'accumulation de carbonates (Bca). A la suite de notre travail, nous pouvons aussi mettre l'accent sur l'importance de l'interaction entre pouvoir chlorosant spécifique de chaque horizon pédologique d'un sol calcaire et son degré d'exploitation par l'enracinement de la Vigne selon les conditions climatiques de l'année, dans l'explication des phénomènes de chlorose ferrique chez la Vigne.

L'application pratique de l'étude entreprise peut être envisagée au niveau de la lutte contre la chlorose ferrique sous plusieurs formes :

— Lutte préventive par cartographie pédologique thématique des zones viticoles calcaires. Nous avons commencé ce genre de travail pour le vignoble Saumurois. Les principaux critères retenus sont les suivants :

- le type de profil pédologique permettant de séparer les zones en deux grands groupes :
  - — sols calcaires minces (40 cm maximum, type rendzine ou brun calcaire) reposant sur roche dure impénétrable aux racines (chloroses classiques d'année humide),
  - — sols calcaires à calciques épais (type brun calcaire à horizon Bca) ou calciques à horizon d'accumulation de carbonates entraînant des chloroses d'année sèche, avec différenciation de la position topographique ;
- le type de roche-mère calcaire présentant un potentiel chlorosant donné. Ce travail de cartographie doit être réalisé à une échelle relativement grande (1/10 000-1/25 000) pour garder son efficacité, car les zones à horizon Bca sont de faible étendue chacune, mais très nombreuses. Une telle cartographie, pour les régions susceptibles d'être plantées en Vigne, permet de définir des degrés dans les risques de chlorose et de prévoir la gamme de porte-greffes la mieux adaptée. En ce qui concerne la chlorose d'année sèche, le choix d'un porte-greffe résistant est nécessaire car le rétablissement de la Vigne en période humide sera dépendant de la résistance intrinsèque du porte-greffe et doit se faire après une analyse physico-chimique complète des différents horizons du sol.

— Lutte curative dans le cas de la chlorose ferrique d'année sèche. On doit rechercher un ensemble de techniques visant à maintenir intact le type de profil, donc la succession des horizons : pour cela, les défoncements profonds avant plantation qui risqueraient de remonter l'horizon Bca sont à déconseiller.

En ce qui concerne l'entretien du sol, le travail traditionnel (buttage, débuttage, scarifiage) qui détruit une grande partie du chevelu racinaire de surface, serait à éviter alors que le désherbage total, favorisant une remontée des racines, serait bénéfique.

Corrélativement, il faut maintenir et utiliser au mieux les réserves hydriques des horizons supérieurs : on peut limiter les pertes d'eau par évaporation en pratiquant le mulching saisonnier (paillage) ; bien entendu, l'emploi de l'enherbement temporaire ou permanent est à déconseiller dans ces cas.

Pour espérer une efficacité maximum du sulfate de fer ou de tout autre apport de fer au sol, il sera utile d'en combiner les apports avec les techniques citées.

Reçu pour publication en juillet 1979.

Summary

Some ecological aspects of iron chlorosis appearance during dry years in the vineyard planted on calcareous soils of the medium Loire Valley

In vineyards of the medium Loire Valley (Chinon, Bourgueil, Saumur), problems of iron chlorosis are numerous. We observe on particular areas very important iron chlorosis phenomens during dry years. There are different pedological calcareous profiles according to topography and stage of pedogenetic evolution. On slopes we notice young and thin soils on all kinds of calcareous rocks, with iron chlorosis problems during rainy years. On horizontal or subhorizontal positions we find more differentiated soils presenting at a variable depth a carbonate accumulation layer (Bca horizon) with an important fine limestone content, but with a very little easily extractable iron content and a high field water capacity. For dry periods the roots activity can contribute to increase CO_2 partial pressure which is favourable to a production of the high bicarbonate quantity. All these physical and chemical characteristics are an important factor of the iron chlorosis apparition in the vineyard during years of low rainfall.

Zusammenfassung

Ekologische gesichtspunkte über das erscheinen der eisenchlorose während eines trockenen jahres auf reben in kalkböden des mittleren Loire Tales

In den Weinbergen des mittleren Loire Tales (Chinon, Bourgueil, Saumur) bemerkt man ein häufiges Auftreten der Eisenchlorose, mit in manchen Bezirken einer Verschlimmerung im Laufe eines trockenen Jahres. Die Untersuchung des chlorierenden Potentials des kalkigen Substrates, zeigt grosse Schwankungen gewisser Eigenschaften, besonders das leicht ausziehbare Eisen betreffend, das mit dem Gehalt an Glaukonitsand verbunden ist. Die Böden selbst zeigen sehr verschiedene pedologische Profile je nach der topographischen Lage und dem pedogenetischen Entwicklungsgrad. Auf Hängen findet man frische und dünne Böden, welches auch der kalkige geologische Stoff sei, die klassische Chlorosen der feuchten Jahre zur Folge haben, deren Intensität vom leicht ausziehbaren Eisengehalt der betreffenden Lage abhängt. Auf Hochebenen, Terrassen und am Ende der Hänge entfalten sich stärker entwickelte Böden, die in variabler Tiefe (60 bis 80 cm) eine Karbonatsanhäufungslage, die Lage Bca, einer Dicke von 5 bis 20 cm, sehr reich an feinem Kalk, arm an leicht auxziehbarem Eisen und eine nutzbare Reserve an hohem Wasser aufweisen. Während der Trockenperiode haben die Wasserversorgungsbedingungen der Rebe eine intensive Ausnützung dieser Lage, durch Wurzeln kleinen Durchmessers (< 1 mm), zur Folge. Die grosse Wurzeltätigkeit in einem schwerdurchlässigen Medium (Mergel) kann zur Druckerhöhung des CO_2 beitragen, und so den Anfall einer grossen Menge Bikarbonats begünstigen. Diese gesamten sehr ungünstigen physiko-chemischen Eigenschaften spielen eine grosse Rolle beim Ausbruch der ernsthaften Rebenchlorosen während eines trockenen Jahres oder Zeitraums.

РЕЭЮМЕ

Экологическая сторона железистого хлороза в засушливые годы и в виноградниках, расположенных на известковых почвах средней долины луара.

МОРЛЯ Р., ДЮПОН Ж., САЛЕТ Ж.

В виноградных краях средней долины Луара (Шинон, Бургель, Сомюр) железистый хлороз является частой болезнью, которая усиливается с засухой в определённых средах. Исследование способности известковых субстратов возбуждать хлороз показывает большие изменения нескольких характеристик (в особенности легкоиЗ-влекаемая железа, связанная с содержанием глауконии в материале).

Сами почвы представляют очень различный педологический профиль в зависимости от топографического положения и уровня педогенеза. На склонах встречаются молодые и тонкие почвы, каков бы ни был известковый геологический материал. Они возбуждают классический хлороз типа «мокрый год», интенсивность которого зависит от содержания легкоизвлекаемой железы в каждом горизонте. На плато и на подошве скатов простираются более развитые почвы, которые представляют горизонт аккумуляции карбонатов в глубине 60-80 см. Этот горизонт Bca с высоким запасом воды и в 5-20 см мощностыо содержит много мелкого известняка и мало легкоизвлекаемой железы. В засушливый год, условия питания винограда водой содействуют интенсивному использованию горизонта растениями < 1 мм. Высокая корневая активность в среде трудной диффузии (мергель) может повысить павление углекислого газа, который способствует производству большого количества бикарбонатов. Эти неблагоприятные физикохимические характеристики играют важную роль в проявлении виноградного хлороза, который наблюдается в засушливые годы.

Références bibliographiques

ADAMS R., 1971. Soil solution in the plant root and its environment. *Va* Polytech. Inst., *Res. Div. Bull.*, 441-478.

BAXTER P. et BELCHER R., 1955. The role of the bicarbonate ion in lime induced chlorosis. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.*, 32-34.

BOXMA R., 1972. Bicarbonate as the most important factor in lime-induced chlorosis in the Netherlands. *Plant Soil*, **37,** 233-243.

BIDDULPH O. et WOODBRIDGE G. G., 1952. The uptake of phosphorus with particular reference to the effect of iron. *Plant Physiol.*, **27,** 432-444.

BROWN J. C., 1960. An evaluation of bicarbonate induced iron chlorosis. *Soil Sci.*, **89,** 246-247.

BROWN J. C., HOLMES R. S., TIFFIN L. O., 1959. Hypotheses concerning iron chlorosis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23,** 231-234.

DUPONT J., 1978. *Les problèmes de l'adaptation de la vigne dans le vignoble de Chinon.* Thèse Doctorat 3e cycle, Université de Poitiers, 74 p.

DUPONT J., MORLAT R., SALETTE J., 1978. Etude écologique des conditions de manifestation de la chlorose ferrique dans le vignoble de la Moyenne Vallée de la Loire. *Communication Symp. Intern. Ecolog. Vitic.*, Constantza, Roumanie, 27-29 sept. 1978.

MILLER G. W., BROWN J. C., HOLMES R. S., 1960. Chlorosis in soybean as related to iron, phosphorus, bicarbonate and cytochrome oxidase activity. *Plant Physiol.*, **35,** 619-625.

OLSEN S. R., BONMAN R. A., WATANABE F. S., 1977. Comportement du phosphore dans le sol et interaction avec les autres éléments nutritifs. *Phosphore Agric.*, **70,** 35-51.

PETERSEN H., 1964. *Differenciation between the pH effect and the bicarbonate ion effect in causing lime induced chlorosis.* Ph. D. Thesis, Utah State University, 79 p.

PATEL G. J., RAMAKRISHNAYYA B. V., PATEL B. K., 1977. Effect of soil and foliar application of ferrous sulphate and of acidulation of soil on iron chlorosis of rice. *Plant Soil* **46,** 209-219.

POUGET R. et JUSTE C., 1972. Le choix des porte-greffes de la vigne pour les sols calcaires. *Connaissance vigne et vin*, **4,** 357-364.

PORTER L. K. et THORNE D. W., 1955. Bicarbonate ion and oxygen level as related to chlorosis. *Soil Sci.*, **79,** 373-382.

REITEMHEIR R. F., 1945. Effect of moisture content on the dissolved and exchangeable ions of soils in acid regions. *Soil Sci.*, **61,** 195-214.

RUTLAND R. B. et BUKOVAC M. J., 1971. The effect of calcium bicarbonate on iron absorption and distribution by chrysanthemum mirifolium (RAM). *Plant Soil*, **35,** 225-236.

SCHINAS S. et ROWELL D. L., 1977. Lime-induced chlorosis. *J. Soil Sci.*, **28,** 351-368.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : B. HURPIN

Imprimerie Jouve, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 7-1980

Dépôt légal : 3e trimestre 1980. N° d'Impression : 27150

CPPAP n° 1426-ADEP

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1980	France Prix T.T.C.	Étranger Prix net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix net
ANNALES AGRONOMIQUES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
APIDOLOGIE, 4 nos par an	100 F	175 F (sauf RFA)	30 F	50 F (sauf RFA)
* ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE				
** ANNALES DE ZOOLOGIE, ÉCOLOGIE ANIMALE				

* Les Annales de Biologie animale, Biochimie Biophysique deviennent : « Reproduction, Nutrition, Développement ».
** Les Annales de Zoologie, Ecologie animale cessent avec le n° 4, volume 11, 1979.
Les articles publiés dans cette série paraîtront désormais dans les *Œcologia, Applicata* de la revue : *Acta Œcologia*.
Pour ces 2 revues s'adresser à C.D.R. Gauthier-Villars, BP 119, 93104 MONTREUIL CEDEX. Tél. (1) 374.12.45.

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Utilisation par les ruminants des pâturages d'altitude et parcours méditerranéens. Xes Journées du Grenier de Theix.
576 p., 1979 ..... **110,00 F**

La Forêt et la Ville. Essai sur la forêt dans l'environnement urbain et industriel.
252 p., 1979 ..... **50,00 F**

Alimentation des ruminants. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants. Besoins alimentaires des animaux et valeur nutritive des aliments.
600 p., 1978 ..... **140,00 F**

Introduction à la statistique en biologie par **S. C. Pearce,** traduction de **J. P. Doazan.**
260 p., 1978 ..... **25,00 F**

L'I.N.R.A., l'eau et la production agricole
270 p., 1978 ..... **50,00 F**

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne. Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud par le Groupe de Recherches I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France, faunistique et biologie, par **H. Le Louarn** et **M. C. Saint Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

La Vache laitière. IXes Journées du Grenier de Theix.
342 p., 1977 ..... **60,00 F**

Amélioration génétique des animaux de ferme. Application aux bovins (sous la Direction de **B. Vissac**).
160 p., 1977 ..... **35,00 F**

Carte pédologique de la France à 1/1.000.000 par **J. Dupuis** ..... **96,00 F**

Cartes pédologiques de France à 1/100.000 ..... **96,00 F** (chacune)
(Vichy, Perpignan, Angoulême, Brives, Dijon, Toulon, Moulins, Condom, Tonnerre, Privas, St-Dié, Lesparre).

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français par **R. Cousin.**
111 p., et 140 fiches, 1974 ..... **168,50 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Auge, P. Allemand, R. Hames.**
144 p., 1973 ..... **63,50 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut National de la Recherche Agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1980, **31** (2), 109-238.

Table des matières

N. AHO, F.-A. DAUDET, Nicole VARTANIAN. — Variations de la réserve facilement utilisable en eau du sol en relation avec différents facteurs écologiques 109

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. II. — Les facteurs de l'adsorption 125

Martine OLLIVIER. — Un modèle d'action des techniques culturales sur le blé. II. — Essai de typologie des principaux départements producteurs de blé 163

R. GRAS, J. CHIAVERINI. — Incidences du milieu et des techniques culturales sur la longévité du lavandin « Abrial » 191

R. MORLAT, J. DUPONT, J. SALETTE. — Aspects écologiques de la manifestation de la chlorose ferrique en année sèche, chez la vigne, dans les sols calcaires de la moyenne vallée de la Loire 219

Contents

N. AHO, F.-A. DAUDET, Nicole VARTANIAN. — Variations in readily available soil water range as a function of different ecological factors 109

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographic review*. Adsorption of pesticides by soils and their constituants. II. — The factors of the adsorption 125

Martine OLLIVIER. — A model of the response of wheat to agrotechnical factors. II. — Classification of the french main departments for wheat production 163

R. GRAS, J. CHIAVERINI. — Effects of the environment and cultivation techniques on the life expectancy of the « Abrial » Lavandin 191

R. MORLAT, J. DUPONT, J. SALETTE. — Some ecological aspects of iron chlorosis appearance during dry years in the vineyard planted on calcareous soils of the medium Loire Valley 219

Les annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 10-036-002-5

annales agronomiques

Trimestriel

1980

Vol. 31. N° 3

inra

AAG
31.3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron. ANAGA9 31 (3) 239-336 (1980)

FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., Paris Cedex 75231

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur de la Station de Biochimie et Physico-Chimie des céréales et de leurs dérivés C. E. R. D. I. A., le Noyer Lambert, 91300 Massy.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— F. GROSCLAUDE, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— J. ASSO, Station de Virologie, Immunologie, Route de Thiverval, 78850 Thiverval-Grignon.

Reproduction, Nutrition, Développement. Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante: C. N. R. Z. 78350 Jouy-en-Josas.

— Ch. THIBAULT.
— L. GUÉGUEN.
— G. PÉTRISSANT.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES. Tél. (3) 950-75-22

annales agronomiques

Trimestriel

1980

Vol. 31. N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1980, **31** (3), 239-257.

Mise au point bibliographique

Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants

III. — Caractéristiques générales de l'adsorption des pesticides

R. CALVET *, Martine TERCÉ * et J. C. ARVIEU **

* *Station de Science du Sol,*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

** *Station de Science du Sol,*
Centre de Recherches agronomiques d'Antibes, I.N.R.A.,
06602 *Antibes*

Résumé

Les matériaux organiques du sol ont en général une capacité d'adsorption plus grande que les minéraux. L'adsorption et la désorption des pesticides par les sols et leurs constituants est en général décrite par une relation du type de l'isotherme de Freundlich. La désorption de pesticides adsorbés par des sols montre toujours un phénomène d'hystérésis.

Les molécules pesticides peuvent se classer en plusieurs catégories selon leur aptitude à être adsorbées. Les molécules acides sont les moins fixées, les molécules cationiques le sont beaucoup plus.

Les valeurs des caractéristiques de l'adsorption (K_d, K_f) ne sont pas reliées à la teneur en argile définie par l'analyse granulométrique. Elles sont par contre souvent très dépendantes de la teneur en matière organique. Dans ce cas, la relation n'est cependant pas toujours évidente notamment pour les teneurs inférieures à 4 p. 100. Il est souhaitable que soient donc définis d'autres critères à la fois pour les minéraux en tenant compte par exemple de l'altération et pour les matières organiques en identifiant les fractions actives et leur aptitude à évoluer.

Après avoir examiné comment décrire l'adsorption puis étudié les différents facteurs susceptibles d'intervenir, nous allons maintenant donner les principales caractéristiques de ce phénomène. Nous aurons cependant l'occasion de constater qu'elles sont parfois d'une portée limitée en raison de la grande variabilité des résultats qui rend toute généralisation difficile. A côté de l'aspect purement descriptif, nous essaierons au cours de ce chapitre de dégager les différentes raisons susceptibles d'expliquer cette situation et d'en déduire les conséquences pour de futures recherches.

I. — Caractéristiques de l'adsorption par les constituants du sol

A. — *Adsorption des pesticides*

1. *Aspect quantitatif de l'adsorption. Isothermes d'adsorption.*

D'un point de vue quantitatif, la seule façon correcte de caractériser l'adsorption est d'utiliser l'isotherme d'adsorption. Par commodité, il est fréquemment fait usage d'un coefficient de distribution K_d, défini de la façon suivante :

$$K_d = \frac{\text{Quantité adsorbée/unité de masse d'adsorbant à l'équilibre}}{\text{Concentration de la solution à l'équilibre}}.$$

Ce coefficient ne décrit complètement le phénomène que dans le cas d'isothermes linéaires. Il est donc important de ne pas oublier cette limitation.

La plupart des résultats publiés montre que l'adsorption peut être représentée par une relation du type de l'isotherme de Freundlich. D'autres descriptions ont parfois été utilisées :

— l'isotherme de Langmuir pour les systèmes suivants : 2,4-D et complexes organo-argileux (Miller et Faust, 1972) ; plusieurs pesticides et un charbon actif (Weber et Gould, 1966) ; chloro-aniline, aniline et sols (Moreale et Van Bladel, 1979) ;

— un polynôme de la concentration à l'équilibre (Lambert, 1967 ; Savage et Wauchope, 1974 ; Savage, 1976).

TABLEAU 1

Caractéristiques de l'adsorption de quelques pesticides sur plusieurs adsorbants minéraux et organiques. Les valeurs de K_f sont données en $\mu g/g$

Adsorption characteristics of some pesticides on several mineral and organic adsorbents

Pesticide	Adsorbant	pH	Température	Caractéristiques de l'isotherme d'adsorption		Auteurs
				K_f	n_f	
Bromacil	Silica-gel	4,6	25°	4,8	0,8	Haque et Coshow, 1971
Bromacil	Illite	7,0	—	2,6	0,9	
Bromacil	Montmorillonite	6-7	—	0,7	1,3	
Bromacil	Acides humiques	6-7	—	10,0	0,7	
Monuron	Matière organique		22 ± 2	92	1,0	Hance, 1967
Monuron	Bentonite		—	16,1	0,8	
Atrazine	Matière organique		—	138,7	0,9	
Atrazine	Bentonite		—	10,2	0,92	
Trifluraline	Poudre de cellulose	6,2	25 ± 1	56,0	1,0	Grover, 1974
Trifluraline	Triacétate de cellulose	4,2	—	1 000,0	1,38	
γHCH	Silicagel		19°8	6,88	0,938	
γHCH	Montmorillonite-Ca		20°	2,92	0,886	
γHCH	Tourbe saturée Ca		20°	331,0	0,969	Mills et Biggar, 1969*b*
βHCH	Silicagel		19°8	2,13	0,971	
γHCH	Montmorillonite-Ca		19°8	3,96	0,863	
βHCH	Tourbe saturée Ca		20°	456	0,95	

De l'examen d'un grand nombre de données expérimentales, il ressort que la capacité d'adsorption de certains matériaux organiques est plus élevée que celle des adsorbants minéraux. Le tableau 1 en donne plusieurs exemples. Les matières organiques du sol jouent donc probablement un rôle très important. Il faut cependant attirer l'attention sur deux points quant à la comparaison avec des adsorbants minéraux :

— le premier se rapporte à la variation des propriétés de la matière organique au cours de l'humification dont l'effet peut être une diminution de la capacité d'adsorption. Dans ces conditions, il peut alors se faire que le rôle des constituants minéraux deviennent plus important ;

— le deuxième concerne les conditions de la comparaison. Celle-ci est en effet fréquemment faite dans des conditions physicochimiques différentes (pH différents comme dans le tableau 1 par exemple) et ne renseigne que partiellement sur la capacité d'adsorption des adsorbants étudiés. Il peut alors en résulter des conclusions erronées. Cette situation est illustrée par la figure 1.

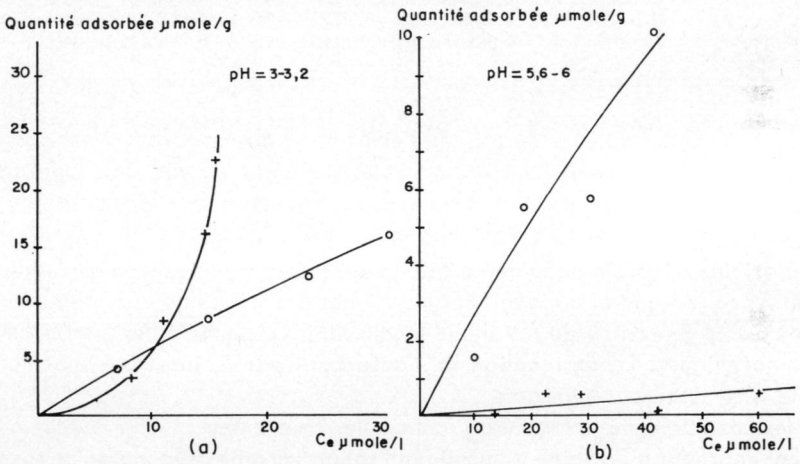


FIG. 1. — *Isothermes d'adsorption de la terbutryne par une montmorillonite calcique* (+) *et par des humates calciques* (⊙) *a* : pH = 3-3,2 ; *b* : pH = 5,6-6. (Gaillardon *et al.*, 1977).

Adsorption isotherm of terbutryne by a Ca-montmorillonite (+) *and by Ca-humates* (⊙) *at two pH values.* *a* : pH = 3-3,2 ; *b* : pH = 5,6-6.

Il apparaît ainsi que le classement de l'adsorption de la terbutryne sur les acides humiques et la montmorillonite étudiés dépend de l'acidité du milieu et de la concentration à l'équilibre. Des comparaisons valables ne peuvent être faites qu'avec des milieux possédant des compositions ioniques identiques et une même concentration à l'équilibre.

Des conclusions peuvent cependant être facilement proposées quand il existe une très grande différence entre les adsorbants comme c'est le cas avec une tourbe et une argile. Quand la différence est moins marquée, il semble nécessaire d'observer une certaine prudence. Pour un matériau donné en effet, les résultats peuvent être très variables d'un auteur à l'autre. Le cas de l'adsorption de l'atrazine et du monuron par une montmorillonite calcique en est un exemple (tabl. 2).

TABLEAU 2

Exemples de valeurs des constantes des isothermes d'adsorption de l'atrazine et du monuron par des montmorillonites saturées en calcium. K_f est exprimée en µg/g

Some constant values from adsorption isotherms of atrazine and monuron by Ca-montmorillonites. K_f is expressed in µg/g

Herbicide	Température	Composition ionique de la solution de mesure		Caractéristiques de l'adsorption		Auteurs
		pH	Sel	n_f	K_f	
Atrazine	22° ± 2	7,9	0	1,0	13	Hance, 1969
Atrazine	20° ± 1	6,9	0	0,42	0,1	Vallet *et al.*, 1973
Atrazine	—	7	0,01 M $CaCl_2$	1,2	4,5	Moyer *et al.*, 1972
Atrazine	25°	8,4	0	1,6	1,4	Yamane et Green, 1972
Monuron	22° ± 2	7,9	0	0,80	24	Hance, 1969
Monuron	—	7	0,01 M $CaCl_2$	0,89	7	Moyer *et al.*, 1972
Monuron	25°	6,7	0,05 M $CaCl_2$	0,83	18,3	Van Bladel et Moreale, 1974
Monuron	—	6,7	0,005 M $CaCl_2$	0,82	21,5	

Compte tenu des valeurs du pK_a de l'atrazine et du monuron, il est possible de considérer que les systèmes sont comparables du point de vue de l'ionisation des molécules organiques. Les résultats présentés sont pourtant très différents, en raison, probablement, de trois facteurs variables d'un travail à l'autre :

— l'origine minéralogique de l'argile ; nous avons vu en effet qu'une montmorillonite du type « Wyoming » n'avait pas les mêmes propriétés qu'une montmorillonite du type « Camp Berteau » du fait d'une localisation en partie différente des substitutions isomorphiques. La désignation de l'adsorbant par le mot montmorillonite ou bentonite n'est donc pas suffisante ;

— les conditions de préparation de l'argile. Elles diffèrent d'un auteur à l'autre et peuvent donc être à l'origine d'une aluminisation variable. Quand on se rappelle le rôle joué par l'aluminium et ses hydroxydes, il n'est pas surprenant que les propriétés d'adsorption soient elles aussi très variables ;

— le rapport masse d'adsorbant/volume ; en milieu neutre ou voisin de la neutralité, ce rapport ne peut avoir d'effet que sur la cinétique du phénomène. Il peut en résulter des erreurs dans la mesure où les quantités adsorbées ne correspondent pas à des états d'équilibre.

2. *Aspect énergétique de l'adsorption.*

L'obtention d'isothermes d'adsorption à différentes températures permet de calculer la chaleur d'adsorption ΔH_a ou la chaleur isostérique d'adsorption ΔH_{iso}. La discussion donnée dans le premier chapitre nous a montré que l'interprétation précise des valeurs trouvées n'était pas facile. Il importe en effet de savoir si l'adsorption a lieu avec un échange et dans ce cas, d'en connaître la stoechiométrie. Ces informations n'étant pas connues, il est très hasardeux d'utiliser ces grandeurs thermodynamiques pour caractériser tel ou tel mécanisme ou tel ou tel type de liaison.

Les valeurs des chaleurs d'adsorption mesurées sont en général assez faibles. Quelques exemples sont donnés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Exemples de valeurs de chaleurs d'adsorption
Some values of the heat of adsorption

Pesticide	Adsorbant	Chaleur d'adsorption kcal mole^{-1}	Auteurs
Atrazine ..	Acide humique	$\Delta H_{iso} = 8$	Li et Felbeck, 1972
Parathion	Matière organique d'un sol	$\Delta H = 0,4$	Leenher et Alrich, 1971
Carbaryl	Matière organique d'un sol	$\Delta H = 2,0$	
γHCH	Tourbe	$\Delta H_{iso} = 4,76$	Mills et Biggar, 1969*a*
γHCH	Bentonite	$\Delta H_{iso} = 1,51$	
γHCH	Silicagel	$\Delta H_{iso} = 7,5$	

Dans la comparaison de deux systèmes pesticide-adsorbant, il est seulement possible de dire que la chaleur d'adsorption est d'autant plus grande que l'énergie d'interaction soluté-surface est grande sous réserve que l'échange soluté-solvant soit le même. La connaissance des chaleurs d'adsorption est donc d'une utilité limitée pour identifier des liaisons. Elle est par contre évidemment très utile pour prévoir les variations des isothermes d'adsorption en fonction de la température. Il s'agit là d'une information indispensable pour effectuer des simulations de comportement.

3. *Cinétiques d'adsorption.*

L'équilibre d'adsorption est atteint plus ou moins rapidement. D'après les travaux de Hance (1967), un temps de 4 à 24 h est nécessaire suivant les adsorbants étudiés. Il ne s'agit cependant pas d'une règle générale car la réalisation de l'équilibre peut parfois demander un temps plus long. C'est ainsi que Jamet et Piedallu (1975) ont observé un temps de 72 h pour l'adsorption de la pyrazone par un sol.

La variation de la quantité Q de pesticide prélevée par l'adsorbant met souvent en évidence deux étapes : une première en temps court et une deuxième pour des temps plus longs à laquelle correspond une variation linéraire de Q avec la racine carrée du temps (fig. 2).

Ce type de résultats a également été observé par Haque *et al.* (1960), Haque et Sexton (1968) et Leenher et Ahlrichs (1971). L'interprétation généralement proposée est la suivante. La première étape correspondrait à l'adsorption des molécules situées au voisinage de la surface et serait limitée par la diffusion moléculaire dans le film d'eau au contact des particules d'adsorbant. Elle peut être décrite par une loi basée sur la théorie des vitesses absolues de réaction. Des valeurs d'énergie d'activation sont données dans le tableau 4. Ces chiffres indiquent qu'une augmentation assez importante de la vitesse d'adsorption peut résulter d'un accroissement de la température. Il faut cependant reconnaître que ces valeurs sont difficilement utilisables dans l'analyse des interactions soluté-adsorbant.

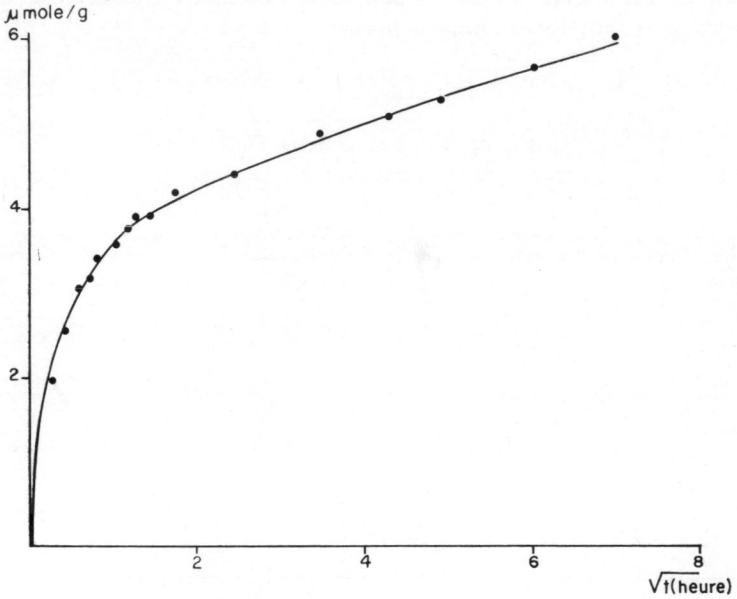


FIG. 2. — *Cinétique de l'adsorption du* 2,4-*D par des acides humiques* (Khan, 1973*a*).
Adsorption kinetics of 2,4-D *on humic acids.*

TABLEAU 4

Exemples de valeurs de l'énergie d'activation de la cinétique d'adsorption
Some values of the activation energy of the adsorption kinetic

Pesticide	Adsorbant	Energie d'activation kcal mole^{-1}	Auteur
Piclorame	Acides humiques	1,81	Khan, 1973
Carbaryl	Matière organique	1,5 à 10,9	Leenher et Alrichs, 1971
Parathion	Matière organique	3,2 à 6,3	Leenher et Alrichs, 1971
2,4-D	Montmorillonite	3,2	Haque *et al.*, 1968
2,4-D	Kaolinite	5,5	

La deuxième correspondrait à une limitation de l'adsorption par la diffusion moléculaire dans les particules d'adsorbant. Ce phénomène est parfois le seul facteur limitant comme dans le cas de l'adsorption par des particules de charbon actif (Weber et Gould, 1966).

Ces faits ont deux conséquences :

- la vrai cinétique d'adsorption ne peut être éventuellement accessible que pendant la première phase,
- le temps nécessaire pour avoir l'équilibre peut être très grand, sa valeur étant une fonction croissante de la porosité et de la taille des particules d'adsorbant.

B. — *La désorption*

Le nombre de travaux consacrés à ce phénomène est considérablement plus petit que pour l'adsorption. Nos connaissances sont réduites à quelques observations. Comme pour l'adsorption, la désorption d'un composé organique diffère d'un adsorbant à l'autre. C'est ainsi que des extractions successives avec de l'eau permettent la récupération de plus grandes quantités de trifluraline et de triallate avec la montmorillonite qu'avec des matériaux organiques (Grover, 1974).

Pour certains couples soluté-adsorbant, le phénomène de désorption présente une hystérésis (tabl. 5). Celle-ci peut être particulièrement marquée et se confondre à la limite avec une fixation irréversible comme cela est parfois observé avec des adsorbants organiques. C'est ainsi que des lavages avec de l'eau ou de l'hexane ne permettent pas de désorber le 2,4-D, le piclorame et le dicamba à partir d'acides humiques (Khan, 1973*b*). Des solvants très polaires ne conduisent pas non plus à une extraction complète et il faut altérer la structure de l'adsorbant par un traitement de méthylation pour augmenter la désorption (tabl. 6).

TABLEAU 5

Quelques exemples d'étude de la désorption
Some examples of desorption studies

Pesticide	Adsorbant	Hystérésis	Auteurs
Monuron	Montmorillonite	Non	Moyer *et al.*, 1972
Atrazine Prométryne	Tourbe après dessiccation	Oui	Moyer *et al.*, 1972
Parathion	Montmorillonite Ca^{2+},Fe^{3+}	Oui	Bowman et Sans, 1977
Terbutryne	Montmorillonite-Ca^{++}	Non	Gaillardon *et al.*, 1977
Terbutryne	Acides humiques Ca^{++}	Oui	Gaillardon *et al.*, 1977

TABLEAU 6

Désorption par différents solvants organiques.
Effet sur la désorption de la méthylation des acides humiques (Khan, 1973*b*)
Desorption by various organic solvents. Effect of humic acid methylation on desorption

Herbicide	Quantité adsorbée µmole/g	Quantités désorbées µmole/g			
		Hexane	Ether/chloroforme/acide acétique (25 : 25 : 1)	Ether	Hexane après méthylation
2,4-D	30	—	6,0	1,2	17,2
Dicamba	44	—	10,0	2,4	28,0
Piclorame....	18	—	3,6	0,8	10,8

A notre connaissance, le phénomène d'hystérésis n'a pas encore été expliqué. Avant de rechercher une explication toutefois, il nous semble important de s'assurer de l'existence d'un équilibre. Pour être atteint, celui-ci demande un temps plus long que pour l'adsorption (Hance, 1967). Il peut donc se faire que l'absence d'équilibre soit parfois faussement interprétée comme la manifestation d'une hystérésis.

II. — Caractéristiques de l'adsorption par les sols

A. — *Caractéristiques physico-chimiques*

1. *Pesticides gazeux.*

Des quelques études concernant l'adsorption des pesticides gazeux par les sols, il résulte que le type d'isotherme obtenue dépend de l'état d'humidité de l'adsorbant :

— sur un sol ayant subi une déshydratation poussée, des molécules très peu polaires telles que le dibromoéthane ou le 1,3-dichloropropène s'adsorbent physiquement. Le phénomène peut être décrit à l'aide de la théorie de Brunauer, Emmet et Teller (Fripiat *et al.*, 1971) ; son amplitude est proportionnelle à la surface externe du matériau déterminée par adsorption d'azote (Jurinak, 1957 ; Jurinak et Volman, 1957) ;

— en présence d'eau adsorbée ou à l'état de vapeur, la forme des isothermes peut être très variable comme nous l'avons vu précédemment (fig. 14, 2e partie).

Dans les conditions d'humidité du sol correspondant à la capacité au champ, l'isotherme d'adsorption est le plus souvent linéaire (Call, 1957 ; Leistra, 1970 ; Smelt et Leistra, 1974 ; Gerstl *et al.*, 1977).

2. *Pesticides liquides ou solides.*

D'après les différents travaux publiés, il apparaît que :

— les isothermes d'adsorption peuvent toujours être décrites par une isotherme du type

$$Q = K_f C_e^{n_f}.$$

TABLEAU 7

Valeurs moyennes des coefficients n_f déterminées à partir de résultats publiés
Average values of n_f coefficients determined from some published results

Pesticide	$n_f \pm 2\sigma$	Nombre de valeurs
Atrazine	0,91 ± 0,04	29
Prométryne	0,81 ± 0,02	9
Diuron	0,74 ± 0,02	27
Linuron	0,85 ± 0,08	17
Monuron	0,78 ± 0,10	17
Piclorame	0,87 ± 0,06	19
Terbacile	1,05 ± 0,16	12
2,4-D	0,97 ± 0,06	7

La constante n_f n'est presque jamais égale à l'unité et l'isotherme est donc presque toujours non linéaire (tabl. 7).

— La désorption semble toujours présenter un phénomène d'hystérésis (Savage et Wauchope, 1974 ; Hornsby et Davidson, 1973 ; Van Genuchten *et al.*, 1974 ; Swanson et Dutt, 1973 ; Farmer et Aochi, 1974). La figure 3 en donne un exemple.

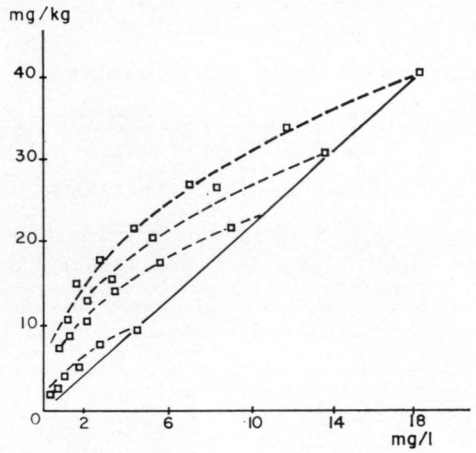


FIG. 3. — *Isothermes d'adsorption et de désorption de l'atrazine par un sol* (Swanson, 1972).
Adsorption-desorption isotherms of atrazine by a soil.

Les isothermes de désorption dépendent de la composition des systèmes au début de la désorption. Elles peuvent être également décrites par une relation du type Freundlich :

$$Q_d = K_{fd}\, C_e^{\,n_{fd}}$$

K_{fd} peut s'exprimer en fonction de K_f n_f et n_{fd}

$$K_{fd} = (K_f)^{n_f/n_{fd}} \times (S_{max})^{(1-n_f/n_{fd})}$$

où S_{max} est la quantité adsorbée quand débute la désorption. Le rapport n_f/n_{fd} dépend aussi de S_{max}. Van Genuchten *et al.*, (1974) ont trouvé la relation suivante pour la désorption du piclorame adsorbé par un sol :

$$\frac{n_f}{n_{fd}} = 2{,}105 + 0{,}062\, S_{max}^{(-1{,}076)}\,.$$

Les caractéristiques thermodynamiques et cinétiques, quand elles sont déterminées, sont du même ordre de grandeur que pour les constituants séparés et sont susceptibles des mêmes commentaires.

B. — *Relation entre l'adsorption et la nature chimique des pesticides*

Cet aspect a été traité en détail dans le précédent chapitre où l'influence de plusieurs propriétés moléculaires a été décrite. Il s'agit ici, par contre, de donner une vue très générale, donc nécessairement schématique du rôle possible de la nature chimique

des molécules pesticides. Ceci n'est possible qu'en se plaçant au niveau des familles chimiques. La figure 4 donne un classement basé sur des valeurs de coefficient de distribution K_d. Cette mesure de l'adsorption n'est très souvent qu'une approximation compte tenu des informations précédemment données. Elle est cependant suffisante pour repérer les principales tendances.

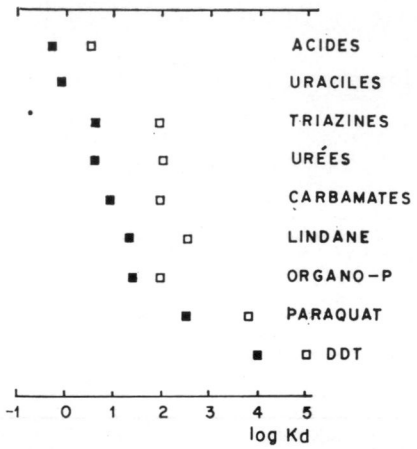


FIG. 4. — *Classification des différentes familles de pesticides en fonction de la valeur du coefficient de distribution : ■ : sols avec une teneur en matière organique inférieure à 4 p. 100 ; □ : sols avec une teneur en matière organique supérieure à 4 p. 100.*

Classification of different groups of pesticides according to the distribution coefficient : ■ : soils with organic mater content less than 4 p. 100 ; □ : soil with organic matter content greater than 4 p. 100.

Les faits marquants sont les suivants :

— les composés acides sont les moins adsorbés. Les colloïdes du sol portent très souvent une charge électrique négative (argiles, substances humiques) et ne peuvent donc pas retenir des molécules anioniques,

— les molécules cationiques sont fortement adsorbées pour ces mêmes raisons,

— les triazines, les urées substituées et les carbamates sont moyennement adsorbées,

— les molécules organochlorés sont très fortement adsorbées. Ceci est probablement dû à la matière organique des sols dont les fractions à caractère hydrocarbure doivent retenir ces molécules par des forces de dispersion.

Ces données ne recouvrent évidemment pas toutes les situations, mais peuvent être très utiles quand il s'agit de connaître des types de comportement possibles.

C. — *Relations entre l'adsorption et la composition des sols*

L'étude des propriétés des adsorbants minéraux et organiques devrait suffire pour connaître la relation entre l'adsorption et la composition du sol. En fait, ceci n'est vrai qu'en partie. On peut effectivement s'attendre à ce que la capacité d'adsorption dépende des teneurs en argile et en matière organique. Les caractéristiques de cette dépendance ne sont cependant pas évidentes *a priori* et les résultats qui vont être exposés montrent qu'une généralisation est encore difficile à faire.

L'influence de la composition du sol peut être étudiée de deux manières :

— en observant l'effet sur l'adsorption de l'élimination de un ou plusieurs constituants du sol,

— en déterminant les corrélations possibles entre les caractéristiques de l'adsorption et les teneurs en différents constituants.

1. *Effet sur l'adsorption de l'élimination des constituants du sol.*

L'élimination totale ou partielle de la matière organique, des oxydes et des hydroxydes a des effets très variables suivants les sols et les molécules pesticides considérées. Le tableau 8 donne des résultats obtenus par Walker et Crawford (1968).

TABLEAU 8

Variations des valeurs du coefficient de distribution K_d dues au traitement des sols par l'eau oxygénée (Walker et Crawford, 1968)

Variations of the values of the distribution coefficient K_d due to H_2O_2 treatment

Caractéristiques des sols				Variations de K_d			
p. 100 argile	p. 100 carbone	Sols traités par H_2O_2 : Surface m^2/g	Sols traités par H_2O_2 : p. 100 carbone	Atrazine	Propazine	Prométone	Prométryne
19,3	1,3	52	0,5	— 0,6	— 0,3	+ 1,3	+ 2,9
17,9	1,5	29	0,6	— 0,6	— 0,6	— 0,3	— 1,3
27,9	1,5	15	0,7	— 0,7	— 0,6	— 0,04	— 1,8
33,5	1,5	36	0,5	— 0,7	— 0,4	— 0,2	+ 0,3
21,0	1,6	31	0,5	— 1,0	— 0,5	— 0,3	— 1,1
22,0	1,6	43	0,7	— 0,6	— 0,7	— 0,5	— 1,6
35,0	1,7	78	0,5	— 0,8	— 0,9	+ 2,2	+ 2,2
63,4	3,1	120	0,5	— 1,6	— 1,0	+ 3,9	+ 6,0

L'extraction d'une grande partie de la matière organique peut entraîner soit une diminution, soit une augmentation de l'adsorption. Les auteurs considèrent que cette variation peut s'exprimer de la façon suivante :

Variations de K_d dues au traitement H_2O_2 = Gain dû aux surfaces minérales rendues accessibles — Pertes dues à l'élimination de la matière organique

Ceci suppose que la matière organique enrobe les particules minérales.

Quand plusieurs traitements sont utilisés, l'interprétation est encore plus difficile comme le montrent les deux exemples suivants. L'élimination de la matière organique et des oxydes de recouvrement entraîne les modifications de l'adsorption du 2,4,5-T notées dans le tableau 9.

TABLEAU 9

Effet sur l'adsorption du 2,4,5-T *de l'élimination de la matière organique et des oxydes* (O'Connor et Anderson, 1974)

Effect on the adsorption of 2,4,5-T *of the elimination of organic matter and oxides*

Teneur du sol en matière organique	Effet de l'élimination	
	Matière organique	Matière organique + oxydes
0,53	—	— —
0,80	—	+
2,43	— —	—
3,66	— —	— —

Diminution de l'adsorption : — — > —

Si l'importance de la matière organique apparaît nettement, le rôle des oxydes est beaucoup moins évident. Le tableau 10 présente d'autres résultats correspondant à l'adsorption de dinitro-anilines. On peut noter un fait curieux : l'augmentation de l'adsorption après l'extraction d'une fraction de la matière organique et la diminution faisant suite à l'élimination de toute la matière organique. Par contre l'enlèvement des oxydes entraîne un accroissement de l'adsorption.

TABLEAU 10

Effet sur l'adsorption de dinitro-anilines de l'élimination de différents constituants de la matière organique du sol (Akins, 1977)

Effect on the adsorption of dinitro-anilines of the elimination of the various constituents of the soil organic matter

Traitement	Produits enlevés	Effet sur l'adsorption
0	—	—
Ether	Cires, huiles	+ 22 p. 100
Ethanol	Résines	+ 34 p. 100
Eau	Polyssaccharides	+ 0,8 p. 100
2 p. 100 HCl	Hémicellulose	+ 38,2 p. 100
80 p. 100 H_2SO_4	Cellulose	+ 77 p. 100
35 p. 100 H_2O_2	Matières organiques	— 21,3 p. 100
Citrate Na, dithionite bicarbonate Na	Oxydes de fer libres	+ 44 p. 100
35 p. 100 H_2O_2 + citrate Na, dithionite bicarbonate Na	Matières organiques + oxydes de fer libres	+ 576,5 p. 100

Cette énumération avait pour but de montrer la grande variabilité des résultats obtenus et de permettre de souligner les difficultés de leur interprétation. En fait, il faut s'interroger sur le véritable sens de ce genre d'expériences en attirant l'attention sur plusieurs points particulièrement importants :

TABLEAU 11

Relations entre les valeurs du coefficient de distribution K_d et les teneurs en argile et en matière organique du sol.
n = nombre d'observations ; r = coefficient de corrélation

Relations between the values of the distribution coefficient K_d and the soil clay and organic matter contents

Molécule	K_d = f (argile) sols avec MO < 4 p. 100			K_d = f (matière organique)					
				Teneurs en MO ⩽ 4 p. 100			Toutes teneurs en MO		
	n	Régression	r	n	Régression	r	n	Régression	r
Atrazine				48	(0,7 ± 0,6) + (0,7 ± 0,2) MO	0,54	74	(0,5 ± 0,4) + (0,60 ± 0,02) MO	0,97
Prométryne	39	(— 1 ± 4) + ((0,4 ± 0,2) A	0,54	39	(0,8 ± 6) + (3 ± 2) MO	0,33	63	(2 ± 2) + (1,84 ± 0,14) MO	0,95
Prométone	37	(— 5 ± 6) + (0,4 ± 0,2) A	0,47				61	(4 ± 2) + (0,33 ± 0,16) MO	0,97
Propazine..	37	(0,9 ± 0,4) + (0,04 ± 0,02) A	0,58	37	(0,5 ± 0,4) + (0,6 ± 0,2) MO	0,70	61	(8,5 ± 0,3) + (0,95 ± 0,4) MO	0,98
Simazine...	23	(0,9 ± 1) + (0,11 ± 0,04) A	0,74	23	(0,0 ± 1,4) + (1,6 ± 0,6) MO	0,73	25	(3,7 ± 0,4) + (1,6 ± 0,4) MO	0,83
Diuron	12	(— 0,3 ± 0,8) + (0,04 ± 0,02) A	0,77	12	(0,4 ± 0,4) + (11 ± 0,6) MO	0,71			
Linuron ...				10	(0,7 ± 0,8) + (0,8 ± 0,4) MO	0,83			
Méthabenz-thiazuron .							14	(0,1 ± 2) + (3,7 ± 1) MO	0,90
Dibromo-éthane....	22	8,68 + 1,31 A	0,65	12	1,91 + 6,39 MO	0,86	22	12,81 ± 2,75 MO (Call, 1957)	0,97

• le constituant minéral ou organique faisant l'objet d'un traitement d'extraction n'est en général éliminé que partiellement. Le rôle de la fraction restante peut alors ne pas être négligeable ;

• les associations organo-minérales et entre minéraux peuvent posséder une capacité d'adsorption élevée (voir 2e partie, paragraphe II.A.2). Dans ces conditions, l'effet des traitements utilisés sur les associations n'est pas à exclure. L'élimination de tel ou tel constituant ne serait pas la principale cause de la variation d'adsorption observée ;

• les différents traitements n'ont pas seulement une action d'extraction. Ils peuvent également modifier les propriétés des constituants du sol non extraits par leurs effets sur l'agrégation des particules, sur la structure et les propriétés des matières organiques et des oxydes et hydroxydes libres ou associés. Ce point nous semble représenter la principale critique de ce type d'étude.

2. *Corrélations entre l'adsorption et la composition des sols.*

Du fait de son intérêt pratique évident, de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des corrélations entre les caractéristiques de l'adsorption et la composition des sols. Les teneurs en matière organique et en argile sont les variables les plus utilisées ; la teneur en oxyde, la surface spécifique, la capacité d'échange et le pH le sont moins fréquemment. Les deux premières ont d'ailleurs conduit aux observations les plus intéressantes. D'après les résultats expérimentaux publiés, il semble que des paramètres tels que le coefficient K_f de l'isotherme de Freundlich ou le coefficient de distribution K_d puissent être représentés par une fonction linéaire de la teneur en matière organique ou en argile. Nous utiliserons donc ce type de représentation dans les comparaisons et les discussions qui suivent.

Il nous a semblé intéressant d'examiner les possibilités de tirer quelques conclusions générales du grand nombre de données publiées. Nous avons donc effectué des calculs de corrélation et de régression linéaire avec toutes les valeurs de K_d, K_f et n_f que nous avons trouvées. Les résultats sont reportés dans les tableaux 11 et 12. Plusieurs observations peuvent être faites :

a) Pour les valeurs de K_d :

— Comme d'autres auteurs l'avaient observé, elles sont peu corrélées à la teneur en argile.

TABLEAU 12

Relations entre la constante d'adsorption K_f et la teneur en matière organique du sol. n = nombre d'observations ; r = coefficient de corrélation

Relation between the adsorption constant K_f and the soil organic matter content

Molécule	Teneurs en MO ⩽ 4 p. 100			Toutes teneurs en MO		
	n	Régression	r	n	Régression	
Atrazine	23	(1,7 ± 5,8) + (0,6 ± 2,2) MO	0,11	29	(8 ± 2) + (7,4 ± 0,6) MO	0,93
s-triazines...	45	(6 ± 8) + (0,07 ± 3,4) MO	0,006	60	(— 11 ± 6) + (6,3 ± 1,2) MO	0,78
Diuron	17	(3,4 ± 1,2) + (2,9 ± 0,6) MO	0,92	27	(0,2 ± 4,8) + (4,1 ± 0,4) MO	0,98
Urées	41	(— 4,8 ± 28) + (8,9 ± 11) MO	0,24	95	(32 ± 10) + (2,5 ± 0,8) MO	0,54

— D'après les valeurs des coefficients de régression :

- un accroissement de la teneur en matière organique entraîne une plus grande augmentation de K_d qu'un accroissement de la teneur en argile. Ceci montre une fois de plus le rôle important joué par la matière organique des sols ;
- la matière organique influence souvent plus l'adsorption des urées substituées que celle des triazines.

— Le coefficient de corrélation entre la valeur de K_d et la teneur en matière organique est en général élevée quand cette variable prend toutes les valeurs possibles. Si par contre, seules sont considérées les valeurs correspondant en moyenne aux sols agricoles français ($\leqslant$ 4 p. 100), le coefficient de corrélation devient beaucoup plus faible dans le cas des triazines. Il est alors plus difficile de parler d'une relation entre K_d et la teneur en matière organique.

b) Pour les valeurs de n_f et K_f :

— Il apparaît que les valeurs de n_f ne sont pas correlées ni à la teneur en argile, ni à la teneur en matière organique.

— La relation entre K_f et la teneur en matière organique est susceptible des mêmes observations que pour K_d.

— Contrairement à K_d, la matière organique influence plus la valeur de K_f des triazines que des urées.

Certains auteurs ont essayé de prendre en compte le rôle de la matière organique en calculant les constantes K_f ou K_d en supposant qu'elle intervenait seule dans l'adsorption (les quantités adsorbées sont alors rapportées à la quantité de carbone présente dans l'échantillon de sol). La variabilité des nouvelles constantes obtenues est cependant suffisante pour interdire une analyse précise du phénomène d'adsorption (Hamaker et Thomson, 1972). Adoptant le même type de démarche, Lambert (1968) a essayé d'introduire une notion de fraction active de la matière organique pour corriger les valeurs des constantes K_f et K_d.

Ces résultats nous conduisent à une certaine perplexité et nous amènent à nous interroger sur le sens et l'utilité de ces études. Il importe tout d'abord de bien préciser l'objectif poursuivi lors de la détermination des relations possibles entre les caractéristiques de l'adsorption et la composition du sol. Si l'objectif est de décrire les mécanismes de l'adsorption et d'expliquer le rôle de tel ou tel facteur, les corrélations sont tout à fait inutiles car elles n'ont aucun pouvoir explicatif. Si l'objectif est d'obtenir une relation numérique entre les caractéristiques de l'adsorption et la composition du sol, les corrélations sont par contre très utiles. Elles fournissent par ailleurs des outils de prévision indispensables dans les applications des modèles de simulation de comportement. C'est dans le cadre de ce deuxième objectif que nous commenterons les observations précédemment données.

Les valeurs de n_f rassemblées dans le tableau 7 montrent que l'utilisation d'un coefficient de distribution constitue une approximation qui peut être assez grossière dans certain cas. Il peut en résulter une augmentation de la variabilité des résultats quand des travaux effectués sur des séries différentes de sol sont comparés.

L'absence de relation avec la teneur en argile n'est pas surprenante. Cette teneur est donnée par une analyse granulométrique. Or, nous avons vu que le type minéralogique des argiles, la composition ionique de la surface, la présence d'oxydes et d'hydro-

xydes libres ou associés sont des facteurs très importants dont l'analyse granulométrique ne rend pas compte.

Il faut tenir compte de la gamme de variation de la teneur en matière organique dans une discussion sur cette variable. Quand elle varie dans un domaine assez grand (séries de sols comprenant des sols humifères, des tourbes ou des terreaux), les coefficients K_d et K_f en dépendent étroitement. Ceci est dû à la capacité d'adsorption élevée des matières organiques. Dans le cas des sols agricoles, par contre, il n'existe pas toujours de relation très étroite. A cela, plusieurs éléments d'explication peuvent être proposés :

— l'origine végétale des matières organiques est souvent très différente d'un sol à l'autre,

— le stade d'humification est variable non seulement d'un sol à l'autre, mais pour un même sol au cours du temps,

— les propriétés des matières organiques dépendent en partie des associations avec les constituants minéraux dont l'importance n'est pas prise en compte par la seule indication de la teneur en matière organique.

Il apparaît donc que pour les sols agricoles, la teneur en matière organique soit un critère d'un intérêt variable. Il faudra dans l'avenir, lui substituer d'autres critères plus efficients d'une part et introduire l'effet du temps pour tenir compte de l'évolution des propriétés d'autre part.

Il est enfin important de considérer que toutes les comparaisons qui viennent d'être faites n'indiquent que des tendances, les conditions d'obtention des résultats étant parfois très différentes d'un travail à l'autre. Par ailleurs, l'analyse des relations entre les caractéristiques de l'adsorption et la composition du sol telle qu'elle vient d'être faite est assez restrictive. Il peut en effet être plus intéressant d'envisager des corrélations non linéaires comme celle observée par Adams et Li (1971) pour l'adsorption du lindane. D'autres paramètres plus spécifiques d'un type d'interaction peuvent également être utiles à considérer. L'étude des relations entre l'adsorption du glyphosate et l'adsorption d'ions phosphate en est un exemple (Hance, 1976).

Reçu pour publication en février 1980.

Remerciements

Nous remercions vivement Messieurs R. Hance (Weed Research Organization, Oxford, England) et J. Lhoste (Roussel-UCLAF, Paris) pour l'aide qu'ils nous ont apportée dans la rédaction de ce mémoire.

Summary

Bibliographic review

Adsorption of pesticides by soils and their constituents

III. — *General characteristics of the pesticides adsorption*

Soil organic materials have generally a greater adsorption capacity than soil minerals. Adsorption and desorption of pesticides by soils and their constituents may be quantitatively described by a Freundlich type relation. An hysteresis phenomenon is frequently observed when desorption is studied.

Pesticide molecules may be classified in several categories according to their ability to be adsorbed ; anionic molecules are generally less adsorbed than cationic molecules.

Values of adsorption characteristics (K_d, K_f) are not function of clay content as defined by mechanical analysis, but they are often closely related to the organic matter content. However, this relation is not clearly demonstrated when organic matter content is less than 4 p. 100. Thus, it would be suitable to define others criteria both for minerals taking into account the weathering, and for organic matter describing the active fractions and their ability to be modified under the humification processes.

Zusammenfassung

Schriftumsstudie
Pestizidenadsorption durch die böden und deren bestandteile

III. — *Allgemeine eigenschaften der pflanzenschutzmitteladsorption*

Die organischen Substanzen des Bodens haben üblicherweise eine grössere Adsorptionsfähigkeit als die Mineralien. Die Adsorption und Desorption der Pflanzenschutzmittel durch die Böden und ihre Bestandteile ist allgemein mit einer der Freundlichs Isotherme vergleichbaren Beziehung beschrieben. Die Desorption von bodenadsorbierten Pflanzenschutzmittel zeigt immer einen Hysteresiseffekt.

Die Pflanzenschutzmittelmolkülex können gemäss ihrer Eignung adsorbiert 34 werden in mehrere Klassen eingeordnet sein. Die SäuremokKüle sind die am wenigstens gebunden, die Kationmoleküle sind viel mehr gebunden.

Die Werte der Adsorptionseigenschaften (K_d, K_f) sind nicht mit dem durch Korngrössenbestimmung festgesetzten Tongehalt verbunden. Dagegen hängen sie oft sehr von dem Gehalt an organischen Substanzen ab. In diesem Fall ist doch die Beziehung nicht immer klar insbesondere für die Gehalte niedriger als 4 p. 100. Deswegen ist es wünschenswert dass andere Kriterien zugleich für die Mineralien unter Beachtung zum Beispiel ihrer Verwitterung und für die organischen Substanzen beim Bestimmen der aktiven Fraktionen und ihrer Fähigkeit zur Entwicklung bestimmt werden.

РЕЗЮМЕ

Библиографическое обозрение. Адсорбция пестицидов в почвах и их компонентах
Признаки.

III. — Общие адсорбции пестицидов.

Р. КАЛЬВЕ, М. ТЕРСЕ, Ж. С. АРВЬЕ.

Вообще адсорбционная способность органических материалов почвы выше способности минералов. Адсорбция и десорбция пестицидов в почвах и их компонентах соответствуют вообще с зависимостью Фрейндлиха. Десорбция пестицидов, адсорбированных в почвах, всегда показывает явление гистерезиса.

Молекулы пестицидов можно отнести к разным категориям по адсорбируемости. Катионные молекулы являются более связанными чем кислые молекулы.

Величины признаков адсорбции (K_d, K_f) не связаны с содержанием глины, определённым с помощью механического анализа. Напротив они часто зависят от содержания органических веществ. Вэтом случае зависимость не всегда очевидна (особенно с содержанием ниже 4 p. 100). Желательно определить другие признаки для минералов (принимая выветривание во внимание) и для органических веществ (определяя активные фракции и их способность к развитию).

Références bibliographiques

ADAMS J. R., LI P., 1971. Soil properties influencing sorption and desorption of lindane. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **35,** 78-51.

AKINS M. N., 1977. The adsorption desorption and volatility of three dinitroaniline herbicides in soil. *Univ. Microfilms Ind Order n°* 77-16 568. *G. A. Abs.* **87** (23) abst 178914 Sect. 005.

BAILEY G. W., WHITE, J. L., ROTHBERG T., 1968. Adsorption of organic herbicides by montmorillonite, role of pH and chemical character of adsorbate. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **32,** 222-234.

BOWMAN B. T., SANS W. W., 1977. Adsorption of parathion, fenitrothion methyl, parathion, aminoparathion and paraoxon by Na^+, Ca^{2+}, Fe^{3+} montmorillonite suspensions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **41,** 514-519.

CALL F., 1957*b*. Sorption of ethylene dibromide on soils at field capacity *J. Sci. Food Agric.* **8,** 137-142.
FARMER W. J., AOCHI Y., 1974. Picloram sorption by soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38** (3), 418-423.
FRIPIAT J., CHAUSSIDON, J., JELLI A., 1971. *Chimie-physique des phénomènes de surface. Applications aux oxydes et aux silicates.* Masson et Cie Editeur, 387 p.
GAILLARDON P., CALVET R., TERCE M., 1977. Adsorption et désorption de la terbutryne par une montmorillonite Ca et des acides humiques seuls ou en mélanges. *Weed Res.* **17,** 41-58.
GERSTL Z., MINGELGRIN U., KRIBUN J., YARON B., 1977. Behavior and effectiveness of vapam applied to soil in irrigation water. In Horowitz M. Ed. Proc. *French-Israël Symp. on behavior of pesticides in soils.* The Volcani Center, Bet Dagan Israël 1975.
GROVER R., 1974. Adsorption and desorption of trifluraline, triallate and diallate by various adsorbents. *Weed Sci.* **22** (4), 405-408.
HAQUE R., COSHOW W. R., 1971. Adsorption of isocil bromacil from aqueous on some mineral surfaces. *Envir. Sci. Techn.*, **5,** 139-141.
HAQUE R., LINSTROM F. T., FREE V. H., SEXTON R., 1968. Kinetic study sorption of 2,4-D on some clays. *Env. Sci. Techn.* **2,** 207-211.
HAQUE R., SEXTON R., 1968. Kinetic and equilibrium study of the adsorption of 2,4-Dichlorophenoxy acetic acid on some surfaces. *J. Colloïd Interface Sci.* **27** (4), 818-827.
HANCE R. J., 1967. The speed of attainment of sorption equilibria in some systems involving herbicides. *Weed Res.* **7,** 29-36.
HANCE R. J., 1969. An empirical relationship between chemical structure and the sorption of some herbicides by soil. *J. Agr. Food Chem.* **17** (3), 630-631.
HANCE R. J., 1969. Influence of pH, exchangeable cation and the presence of organic matter on the adsorption of some herbicides by montmorillonite. *Can. J. Soil Sci.* **49,** 357-364.
HANCE R. J., 1976. Adsorption of glyphosate by soils. *Pestic. Sci.* **7** (4), 363-366.
HORNSBY A. G., DAVIDSON J. M., 1973. Solution and adsorbed fluometuron concentration distribution in a water saturated soil. Experimental and predicted evaluation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **37** (6), 823-828.
JAMET P., PIEDALLU M. A., 1975. Etude de l'adsorption et de la désorption de la pyrazone (amino-5 chloro-4-phényl-2 2H pyridazinone-3) par différents types de sols. *Weed Res.* **15,** 113-121.
JURINAK J. J., 1957. Adsorption of 1-2 dibromo-3-chloropropane vapors by soils. *J. Agric. Food Chem.* **5,** 598-601.
JURINAK J. J., VOLMAN D. D., 1957. Application of the BET equation to ethylene dibromide adsorption by soils. *Soil Sci.* **83,** 487-496.
KHAN S. U., 1973*a*. Equilibrium and kinetic studies of the adsorption of 2,4-D and picloram on humic acid. *Can. J. Soil Sci.* **53,** 429-434.
KHAN S. U., 1973*b*. Interaction of humic acid with chlorinated phenoxyacetic and benzoic acids. *Environ. letters* **4** (2), 141-148.
LAMBERT S. M., 1967. Functional relationship between sorption in soil and chemical structure. *J. Agr. Food Chem.* **15** (4), 572-576.
LEENHER J. A., AHLRICHS J. L., 1971. A kinetic and equilibrium study of the adsorption of carbaryl and parathion upon soil organic matter surfaces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **35,** 700-704.
LEISTRA M., 1970. Distribution of 1-3 dichloropropene over the phases in soil. *J. Agric. Food Chem.* **18,** 1124-1126.
LI G. C., FELBECK G. T., 1972. A study of the mechanism of atrazine adsorption by humic acid from muck soils. *Soil Sci.* **113** (2), 140-148.
MILLER R. W. FAUST S. D., 1972. Sorption from aqueous solutions by organic clays 2,4-D bentone. *Adv. in Chemistry series* III, 121-134.
MILLS A. C., BIGGAR J. W., 1969*a*. Adsorption 1. 2. 3. 4. 5. 6. Hexachlorocyclohexane from solution : the differential heat of adsorption applied to adsorption from dilute solutions on organic and inorganic surfaces. *J. Colloïd Interface Sci.* **29** (4), 720-731.
MILLS A. C., BIGGAR J. W., 1969*b*. Solubility temperature effect on the adsorption of γ and βBHC from aqueous and hexane solutions by soil material. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33,** 210-216.
MOREALE A., Van BLADEL R., 1979. Soil interaction of herbicide-derived aniline residues. A thermodynamic approach. *Soil Sci.* **127** (1), 1-9.
MOYER J. R., KERCHER R. B., HANCE R. J., 1972. Desorption of some herbicides from montmorillonite and peat. *Can. J. Soil Sci.* **52** (3), 439-448.
O'CONNOR G. A., ANDERSON J. L., 1974. Soil factors affecting the adsorption of 2, 4, 5-T. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38** (3) 443-437.
SAVAGE K. E., 1976. Adsorption and mobility of metribuzin in soil. *Weed Sci.* **24** (5), 525-528.
SAVAGE K. E., WAUCHOPE R. D., 1974. Fluometuron adsorption desorption equilibria in soil. *Weed Sci.* **22** (2), 106-110.
SMELT J. M. and LEISTRA M., 1974. Conversion of metam sodium to methyl isothiocyanate and basic data on the behavior of methyl isothiocyanate in soil. *Pestic. Sci.* **5,** 401-407.
SWANSON R. A., 1972. *Prediction of atrazine. Distribution and movement in soil systems.* Ph. D., University of Arizona. Agriculture Soil Science.

SWANSON R. A., DUTT G. R., 1973. Chemistry and physical processes that effect atrazine movement and distribution in soil systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **37,** 872-876.

VALLET M., CALVET R., CHAUSSIDON J., 1973. Remarques complémentaires sur quelques aspects physico-chimiques de l'adsorption de l'atrazine par les montmorillonites. *Proc. Eur. Weed Res. Coun. Symp. Herbicides-Soil*. Paris, 41-50.

VAN BLADEL R., MOREALE A., 1974. Adsorption of fenuron and monuron (substituted ureas) by two montmorillonite clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38,** 244-249.

VAN GENUCHTEN M. Th., DAVIDSON J. M., WIERENGA Q. J., 1974. An evaluation of kinetic and equilibrium equations for the prediction of pesticide movement through porous media. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38,** 29-36.

WALKER A., CRAWFORD D. V., 1968. The role of organic matter in adsorption of the triazine herbicides by soils. *Isotopes and radiation in soil organic matter studies. Proc. 2nd Symp. int. Atomic Energy Agency* (Vienna), 91-108.

WEBER W. J., GOULD J. P., 1966. Sorption of organic pesticides from aqueous solution. *Advance in Chem. Series* **60,** 280-304.

YAMANE V. K., GREEN R. E., 1972. Adsorption of ametryne and atrazine on an oxisol montmorillonite and charcoal in relation to pH and solubility effects. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **36** (1), 58-64.

Ann. agron., 1980, **31** (3), 259-272.

Comportement des ions Al et Fe en présence de silice et de cations divalents

Huguette BESSON * (1), Simonne CAILLÈRE * et S. HÉNIN **

* *Muséum national d'Histoire Naturelle,*
61, rue Buffon, 75005 Paris

** *Station de Science du Sol,*
Centre national de Recherches agronomiques I.N.R.A.,
78000 Versailles

Résumé

Les auteurs se proposent de confirmer à partir de gels silicoferriques et silicoalumineux en présence de gels d'alumine ou de fer, des résultats acquis antérieurement à partir d'autres matériaux. Les expériences consistent à placer séparément dans des sacs à dialyse baignant dans l'eau permutée, des substances susceptibles de réagir entre elles pour donner de nouveaux composés. Les produits obtenus se forment généralement à l'intérieur des sacs au voisinage des corps les moins solubles.

Ces résultats se trouvent confirmés. En particulier, il apparaît que si des précipités d'hydroxydes de fer ou d'alumine sont placés seuls, ils cristallisent sur place sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde. Si de la silice a été introduite par ailleurs, cette évolution est inhibée.

Par contre, si on introduit dans les sacs des coprécipités de silice et d'hydroxyde, l'hydroxyde ne cristallise pas mais acquiert une certaine mobilité.

Enfin, si l'on introduit dans un sac, un gel coprécipité et dans un autre, du carbonate de magnésium hydraté, il y a dissociation du coprécipité et la silice s'associe au magnésium.

Au cours d'une série de recherches (Besson, Caillère et Hénin, 1975, 1977*a* et *b*), en opérant en milieu liquide confiné, nous avons constaté que des composés minéraux sont susceptibles de céder une partie de leurs constituants quand ceux-ci sont capables de former de nouvelles combinaisons. Ces dernières prennent généralement naissance non au sein de la phase liquide mais au voisinage des composés minéraux dont les constituants sont les moins solubles ou les moins mobiles. De tels faits peuvent s'observer dans le milieu naturel (Hénin et Pédro, 1979).

Les expériences décrites dans cette note ont été effectuées, comme dans les essais précédents, en introduisant les composés séparément dans des sacs à dialyse contenant de l'eau permutée. Ces sacs sont eux-mêmes immergés dans un bécher contenant le même liquide (voir fig. 1). L'ensemble est placé dans une étuve réglée à 60°, le volume du système étant maintenu constant par addition d'eau permutée.

(1) Adresse actuelle : Laboratoire de Chimie analytique, Institut National Agronomique, 16, rue Claude Bernard 75231 Paris Cedex 05.

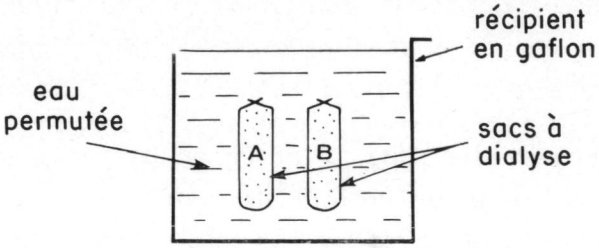


FIG. 1. — *Croquis du dispositif expérimental.*

Les matériaux mis en expérience sont placés dans les sacs A et B. Dans quelques cas tels que les essais 1*a* et 1*b*, il n'y a qu'un seul sac.

Experimental apparatus.

The samples are placed in the bags A and B. In some cases (c. g. the experiments 1*a* and 1*b*), there is just one bag.

Dans les travaux antérieurs, nous avions étudié, dans les mêmes conditions, le mode d'évolution de minéraux phylliteux, de gels de silice ou de gels silicoalumineux d'une part et de carbonates ou d'hydroxydes de Mg et de Ni d'autre part. Nous avons voulu vérifier si les conclusions auxquelles nous étions parvenus sont encore applicables à des systèmes où la silice serait apportée soit à l'état pur, soit sous forme de gels silicoferriques ou silicoalumineux ; des gels silicomagnésiens ont été également utilisés à titre de comparaison. Ces corps ont été mis respectivement en présence de composés magnésiens ou d'hydroxydes de fer ou d'alumine fraîchement précipités.

Il est évident que, dans les systèmes considérés, le composé magnésien ou l'hydroxyde mis dans l'un des sacs était de nature différente de celui associé à la silice dans l'autre sac.

L'examen à l'aide des rayons X du contenu des sacs en fin d'expérience a conduit à mettre en évidence la présence certaine ou possible (substance mal cristallisée) de composés de néoformation. Ces conclusions ont été vérifiées par les courbes thermopondérales qui, en outre, ont permis d'évaluer l'importance des transformations. Enfin, l'analyse chimique des produits recueillis a servi de base au calcul des quantités d'éléments transférés.

I. — Cas des systèmes Fe et Si/Fe

Le fer et la silice ont été introduits dans trois expériences caractérisées de la manière suivante :

a) Un précipité d'hydroxyde ferrique est mis dans un sac à dialyse, on étudie son comportement et les variations de composition du liquide dans lequel il baigne.

b) Un coprécipité : 2 Si/Fe^{3+} est placé dans un sac qui baigne dans une solution dont on étudie la composition.

c) Un sac renferme un gel de silice, l'autre un précipité d'hydroxyde ferrique.

On a observé la composition des solides des deux sacs et celle des solutions en fin d'expérience.

Rappelons qu'à l'origine, le liquide dans lequel les sacs sont immergés est de l'eau permutée.

Les résultats obtenus sont réunis dans le tableau suivant :

TABLEAU 1

Composition des solides des sacs à dialyse et des solutions en fin d'expérience
Composition of the solids inside the dialyse bags and solutions composition at the end of the experiment

Essais	SiO_2 sorti / SiO_2 restant *	Aspect de la solution sac « SiO_2 »	Fe_2O_3 sorti / Fe_2O_3 restant *	Aspect de la solution sac « $Fe(OH)_3$ »	Aspect de la solution extérieure
(*Ia*) $Fe(OH)_3$ seul	—	—	0,11	limpide incolore	rouge trouble
(*Ib*) 2 Si/Fe seul	1,0	rouge orangé limpide	0,38		rouge orangé trouble
(*Ic*) Sac SiO_2 . . . . . Sac $Fe(OH)_3$	1,1	incolore limpide	0	incolore limpide	incolore limpide

* « Restant » indique qu'il s'agit de la substance restant dans le sac où elle avait été introduite en début d'expérience.

Le premier essai (*Ia*) montre que l'hydroxyde de fer, précipité seul, peut diffuser dans la solution extérieure. Le produit restant dans le sac est cristallisé sous forme d'un mélange formé par 80 p. 100 de goethite (courbe I, fig. 2) et d'hématite. Le produit en suspension est amorphe et le fer y est associé à des traces d'ion nitrique. Cet élément provient de la solution de $Fe(NO_3)_3$ à partir de laquelle le fer a été précipité.

Tout se passe donc comme si le précipité évoluait en perdant l'anion nitrique associé au fer, qu'il entraîne avec lui, l'hydroxyde restant dans le sac, passant à l'état cristallin. Comme le fer en suspension est resté amorphe, tout porte à croire que la présence de l'ion nitrique inhibe la cristallisation. Malheureusement, bien que le fer ait été précipité à pH 7, le pH baisse ultérieurement pour atteindre 3,5 en fin d'expérience. Il est donc difficile d'extrapoler ce résultat à des milieux de pH très différents.

Par contre, dans le second essai (*Ib*), la silice et le fer associés dès l'origine par coprécipitation se montrent très mobiles ; on en a la preuve qualitative par le fait que toutes les solutions sont colorées et plus encore, une preuve quantitative, car la moitié de la silice introduite et 38 p. 100 du fer ont migré (le pH est de 7,75). Comme dans le cas où le fer est seul (*Ia*), l'anion, ici la silice, migre plus vite que le fer lui-même. Toutefois il ne se produit aucune cristallisation ni dans le sac, ni dans la solution (courbe II, fig. 2).

Dans le troisième exemple (*Ic*), on constate encore une grande mobilité de la silice mais le fer est complètement immobile. Toutefois, 40 p. 100 de cet élément cristal-

lise sur place sous forme de goethite bien qu'une quantité notable de silice ait été fixée (courbe III, fig. 2).

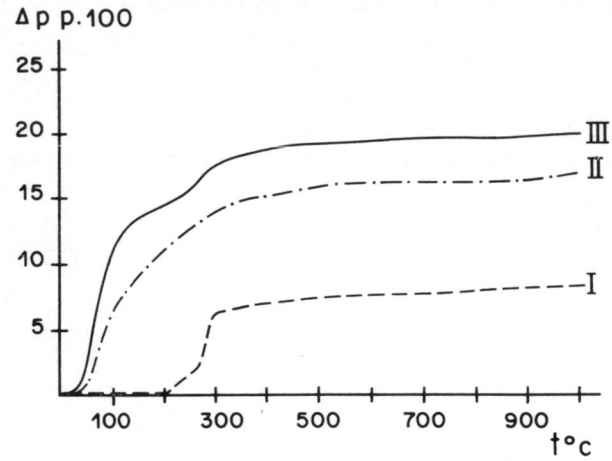


FIG. 2. — *Courbes thermogravimétriques*

I) du précipité de $Fe(OH)_3$ après dialyse montrant la présence d'environ 80 p. 100 de goethite ;
II) du gel 2 Si/Fe^{3+} après dialyse de même durée que pour (I), typique de la déshydratation d'une substance amorphe ;
III) du précipité d'hydroxyde de fer vieilli en présence d'un gel de silice. L'allure de la courbe entre 0 et 200 °C traduit la présence d'un gel silicoferrique et entre 200° et 320°, celle de 40 p. 100 de goethite.

Thermogravimetric curves

I) of the $Fe(OH)_3$ precipitate after dialysis, showing the presence of goethite ($\simeq$ 80 p. 100) ;
II) of 2 Si/Fe^{3+} gel for the same dialysis as in I. The curve is typical of the dehydration of an amorphous material ;
III) of the iron hydroxyde precipitate ageing in the presence of a silica gel. The shape of the curve between 0 and 200 °C indicates the presence of a SiFe gel and between 220° et 320 °C, the presence of goethite ($\simeq$ 40 p. 100).

Ces résultats montrent que la présence de silice dans la solution s'oppose à la mise en solution du fer.

On retrouve un fait déjà signalé par Bétrémieux (1951) qui, dans des milieux susceptibles de dissoudre le fer à l'état ferreux par des processus d'oxydoréduction, liés à des fermentations, avait constaté que l'introduction de silice ou de l'ion PO_4^{3-} diminuait dans des proportions importantes la quantité de fer passé en solution. En d'autres termes, si le fer préalablement associé à un anion peut migrer (*Ib*), la présence de ce même anion au sein de la solution immobilise l'hydroxyde de fer (Ic) alors que celui-ci, isolé, passe en solution (*Ia*).

II. — Cas des systèmes : Si/Fe-Mg ou Ni

Le but de ces essais était d'étudier le comportement d'un gel Si/Fe, placé dans un sac à dialyse, vis-à-vis de composés contenant Mg ou Ni, placés dans un autre sac. Les résultats expérimentaux sont regroupés dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Résultats expérimentaux sur le comportement d'un gel Si/Fe
Experimental results on the gel Si/Fe behaviour

Essais	$\frac{SiO_2 \text{ sorti}}{SiO_2 \text{ restant}}$	$\frac{Fe_2O_3 \text{ sorti}}{Fe_2O_3 \text{ restant}}$	Aspect de la solution sac Si/Fe	$\frac{MgO \text{ sorti}}{MgO \text{ restant}}$	$\frac{NiO \text{ sorti}}{NiO \text{ restant}}$	Sol. Mg ou Ni	Sol. ext.
	Sacs Si/Fe			Sacs à cations divalents			
(II*a*) 2 Si/Fe (sac) ..... CO_3Mg (autre sac) ..	1	tr.	incolore limpide	0,80	—	incolore limpide	incolore limpide
(II*b*) 2 Si/Fe (sac) ..... CO_3Ni (autre sac) ..	4,5	0,15	rouge sang limpide	—	tr	incolore limpide	jaunâtre légèrement trouble

C'est ainsi que dans l'essai (II*a*) un gel de composition 2 Si/Fe a été placé dans un sac et du carbonate de magnésium hydraté dans l'autre sac. Le gel silicoferrique a été obtenu en mélangeant en proportions convenables des solutions concentrées de sili-

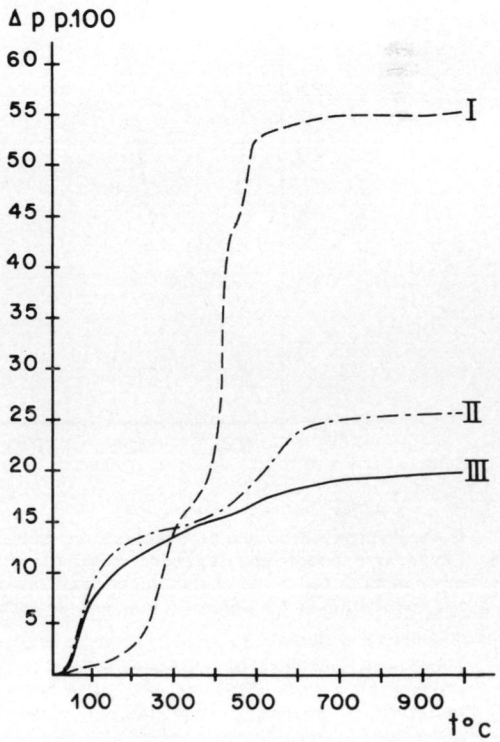


FIG. 3. — *Courbes thermogravimétriques*

I) de l'hydrocarbonate de Mg utilisé comme source de Mg ; II) du produit du sac renfermant initialement l'hydrocarbonate de Mg après fixation de silice. La perte de poids entre 400° et 600 °C révèle la présence d'environ 50 p. 100 de phyllite à 7 Å ; III) du produit recueilli en fin d'expérience dans le sac renfermant initialement le gel 2 Si/Fe^{3+}. Courbe d'un corps amorphe ; cependant noter la forme du diagramme entre 300 et 600 °C qui traduit la présence de phyllite mal cristallisée. A comparer avec les courbes III des planches I et II.

Thermogravimetric curves

I) of Mg hydrocarbonate used as Mg source ; II) of the substance in the bag which contained in the beginning Mg hydrocarbonate after silica fixation. The weight loss between 400 and 600 °C indicates the presence of 7 Å phyllite ($\simeq$ 50 p. 100) ; III) of the substance obtained at the end of the experiment in the bag which contained at starting 2 Si/Fe^{3+} gel (amorphous material). However the shape of the curve between 300° and 600 °C indicates the presence of badly crystallized phyllite (to compare with curves nr III of the figures 1 and 3).

cate de potasse et de nitrate de fer. Le coprécipité ainsi préparé a été lavé jusqu'à début de dispersion. L'examen des produits après 6 mois montre que la moitié de la silice a migré vers le sac renfermant le carbonate de magnésium, mais le fer n'a pratiquement pas bougé, ce que confirme le fait que les solutions sont incolores. Une quantité de magnésium un peu plus faible que celle de la silice a migré vers le sac renfermant à l'origine le gel silicoferrique. Les rayons X montrent dans le produit final contenu dans ce sac la présence d'une phyllite à deux couches mal cristallisée (présentant une variation de l'équidistance 001 par dessiccation). Effectivement la courbe III, figure 3, ne montre pas d'accident net. Par contre, il s'est formé, du fait de la migration de la silice, une phyllite à 7 Å dans le sac renfermant initialement le composé magnésien (courbe II, fig. 3) à comparer avec celle du produit initial (courbe I, fig. 3). Le pH en fin d'expérience était de 8,2.

Un essai (II*b*) effectué suivant le même protocole : le gel 2 Si/Fe étant placé dans un sac, l'autre sac renfermant du carbonate de nickel, a conduit aux résultats suivants :

La silice a migré plus intensément que dans l'essai précédent, les 4/5 environ de la quantité introduite dans le sac s'étant déplacés. Une petite quantité de fer a également migré, ainsi que le montre le résultat des analyses et la couleur rouge sang de la

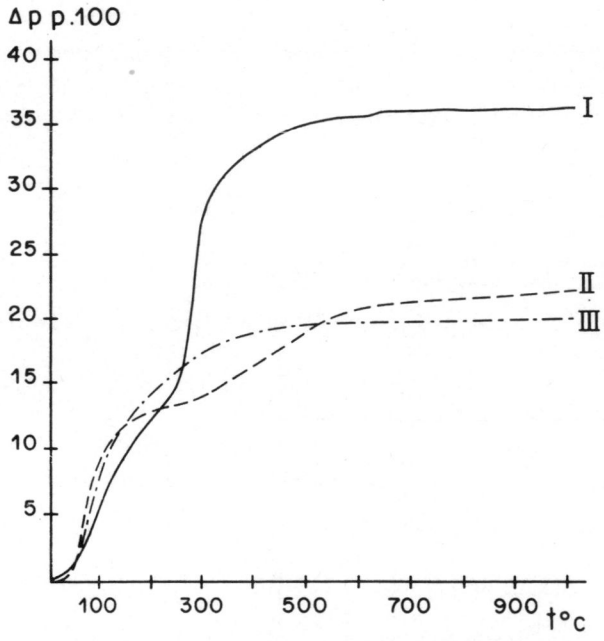


FIG. 4. — *Courbes thermogravimétriques*

I) de l'hydroxycarbonate de nickel (source de Ni) ; II) du produit du sac renfermant initialement l'hydroxycarbonate de nickel après fixation de silice. La perte de poids entre 350° et 550° C révèle environ 40 p. 100 d'une phyllite nickélifère ; III) du produit recueilli en fin d'expérience dans le sac renfermant le gel 2 Si/Fe^{3+} (typique d'un corps amorphe).

Thermogravimetric curves

I) of the Ni hydroxicarbonate (as Ni source) ; II) of the substance in the bag which contained, at starting, Ni hydroxicarbonate after silica fixation. The weight loss between 350° and 550 °C indicates a Ni-phyllite ($\simeq$ 40 p. 100) ; III) of the substance obtained at the end of the experiment in the bag which contained 2 Si/Fe^{3+} gel (amorphous material).

solution du sac contenant le gel silicoferrique. Contrairement au magnésium, seules des traces de nickel ont migré à l'extérieur du sac où le carbonate avait été placé. Dans le sac contenant le nickel il s'est formé également une petite quantité de phyllite à 7 Å (courbe II, fig. 4) à comparer avec la courbe I, figure 4 correspondant au carbonate de nickel. Par contre, aucune cristallinité n'apparaît dans le sac contenant le gel silicoferrique, ni à l'examen à l'aide des rayons X, ni sur la courbe thermopondérale (courbe III, fig. 4). En fin d'essai, le pH était de l'ordre de 5.

En conclusion, la comparaison de ces deux essais montre la mobilité de la silice. En présence du magnésium (II*a*) cette mobilité est plus faible, probablement parce que l'arrivée de magnésium dans ce sac amène la précipitation d'une partie de la silice dissoute. D'autre part, tout se passe comme s'il y avait décomposition du complexe silicoferrique puisque le fer reste immobile. Du fait de la mobilité de la silice et du magnésium il y a néogenèse de phyllite dans les deux sacs.

Par contre, dans le cas du nickel (II*b*), la silice étant plus mobile entraîne des traces de fer qui précipitent à l'extérieur des sacs, ainsi qu'en témoigne l'aspect jaunâtre et trouble du liquide. Il est surprenant que, dans ces conditions de pH, le nickel ne migre pratiquement pas ; ce qu'il faut probablement attribuer à l'arrivée importante de silice.

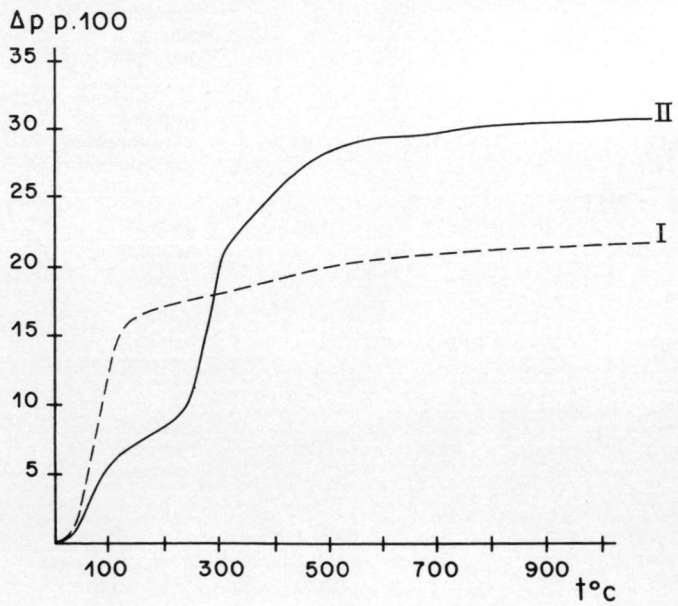


FIG. 5. — *Courbes thermogravimétriques*

I) du gel de silice en fin d'expérience ; II) de l'hydroxyde d'aluminium en fin d'expérience ; présence de 30 p. 100 de gibbsite et d'un peu de boehmite. La perte de poids entre 15 et 250 °C est due à un gel silicoalumineux.

Thermogravimetric curves.

I) of the silica gel at the end of the experiment ; II) of the aluminum hydroxide, at the end of the experiment ; presence of gibbsite ($\simeq$ 30 p. 100) and of a little boehmite. The weight loss between 150° and 250 °C is due to a Si-Al gel.

III. — Cas des systèmes complexes Si-Al/Fe et Si-Mg/Fe

Le but de ces essais a été, comme précédemment, de mettre en évidence les différences de mobilité des éléments Si, Al, Fe ou Mg, suivant la nature des liaisons existant entre eux, au début de l'expérience, et aussi en fonction de la présence d'éléments avec lesquels ils étaient susceptibles de réagir.

Les résultats obtenus pour l'ensemble des systèmes étudiés dans ce paragraphe sont regroupés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Resultats expérimentaux dans le cas des systèmes complexes Si-Al/Fe et Si-Mg/Fe
Experimental results about Si-Al/Fe and Si-Mg/Fe systems

Essais	Sac Si/Al		Sac $Fe(OH)_3$ ou $Al(OH)_3$	Solution extérieure
	SiO_2 sorti / SiO_2 restant	Al_2O_3 sorti / Al_2O_3 restant		
(IIIa_1)				
SiO_2 (un sac)			gibbsite,	léger
Al_2O_3 (autre sac)	0,33	tr.	silicate	précipité
(4 mois)			amorphe	zéolite ?
(IIIa_2)				
SiO_2 (un sac)			gibbsite	léger
Al_2O_3 (autre sac)	0,37	0,02	pseudoboehm. +	précipité
(12 mois)			silicate amorphe	amorphe
(IIIb_1)				
2 Si/Al (un sac)	0,23	0,06	goethite	limpide
$Fe(OH)_3$ (autre sac)			hématite	non coloré
(IIIb_2)				
3 Si/Al (un sac)			goethite	limpide
$Fe(OH)_3$ (autre sac)	0,65	0,62	hématite +	incolore
			silicate amorphe	
(IIIb_3)				
(3 Si + Al) (un sac)			goethite	limpide
$Fe(OH)_3$ (autre sac)	0,12	0,08	hématite +	incolore
			silicate amorphe	
(IIIc)				
Si/Mg (un sac)	0,07	MgO sorti / MgO restant 0,02	Al_2O_3 sorti / Al_2O_3 restant 0,04	limpide
$Al(OH)_3$ (autre sac)				incolore

Les deux premiers essais (IIIa_1) et (IIIa_2) avaient pour objet de mettre en évidence la mobilité relative de la silice provenant d'un précipité et celle d'un hydroxyde d'aluminium obtenu également par précipitation ; chacun de ces éléments étant placé dans des sacs différents. Ces deux essais ne diffèrent que par leur durée. Les résultats montrent encore une mobilité sensible de la silice (un quart de la quantité introduite) et l'inertie presque totale de l'aluminium. Il est seulement à noter que le fait de multi-

plier par trois la durée de l'expérience ($IIIa_1$) à ($IIIa_2$) n'a pratiquement pas modifié le résultat. Toutefois, si l'alumine ne se déplace pratiquement pas, elle cristallise partiellement sur place (courbe II, fig. 5). Une autre fraction se combine à la silice pour former un gel. Cette expérience permet de préciser le comportement relatif de Si et de Al et servira de référence pour l'étude des systèmes qui vont suivre.

Les deux essais suivants ($IIIb_1$) et ($IIIb_2$) ont pour but de mettre en évidence la mobilité des éléments d'un gel Si/Al, obtenu par coprécipitation, en présence d'un hydroxyde de fer. Les gels Si/Al sont placés dans un sac, l'hydroxyde de fer fraîchement précipité dans un autre sac. La différence entre les deux essais ($IIIb_1$) et ($IIIb_2$) est que, dans le premier, le gel silicoalumineux répond à la composition 2 Si/Al et dans le second à 3 Si/Al.

Dans les deux cas, il y a transfert de silice vers le sac renfermant le fer. Pour le rapport 2 Si/Al, le transfert de silice correspond à 1/5 de la quantité initiale. La silice est accompagnée par une petite quantité d'alumine.

Par contre, pour le gel 3 Si/Al ($IIIb_2$), la quantité de silice correspond au 1/3 de la silice mise en œuvre ; de plus dans ce cas, la mobilité de l'alumine est particulièrement élevée. La quantité d'hydroxyde de fer ne varie presque pas mais le produit, amorphe au départ, cristallise en goethite et hématite et ces minéraux sont accompagnés par un silicate amorphe (courbe II, fig. 6).

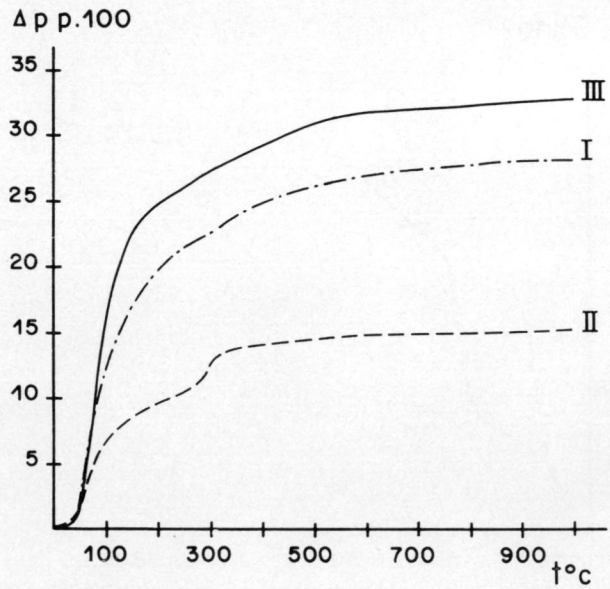


FIG. 6. — *Courbes thermogravimétriques*

I) du gel coprécipité 3 Si/Al en fin d'expérience (corps amorphe) ; II) de l'hydroxyde de fer en fin d'expérience — courbe d'un corps amorphe jusqu'à 250 °C. Entre 250° et 350 °C la perte de poids révèle environ 30 p. 100 de goethite ; III) du mélange gel de silice et hydroxyde d'alumine amorphe. Après 4 mois d'expérience, la courbe est typique d'un produit amorphe.

Thermogravimetric curves

I) of a coprecipitated gel 3 Si/Al at the end of the experiment (amorphous material) ; II) of iron hydroxide at the end of the experiment ; the shape of the curve up to 250 °C indicates the presence of an amorphous material. The weight loss between 250° and 350 °C indicates the presence of goethite (≃ 30 p. 100). III) of the mixture silica gel and amorphous aluminum hydroxide. After 4 months experiment the curve is typical of an amorphous product.

Si on compare les résultats des expériences ($IIIa_1$) et ($IIIa_2$) à ($IIIb_1$) et ($IIIb_2$), on constate que, dans les expériences *b*, le comportement de la silice est analogue à celui qu'il présente dans les expériences *a*. Il en va de même des hydroxydes de fer et d'alumine qui cristallisent partiellement : l'alumine en gibbsite et le fer en goethite et hématite ; accompagnées par un gel constitué par de la silice (ayant atteint le sac par migration) et de l'hydroxyde correspondant.

L'essai ($IIIb_3$) est à comparer à l'essai ($IIIb_2$). La différence essentielle est qu'au lieu d'avoir préparé un gel mixte par coprécipitation de silice et d'alumine (cas de ($IIIb_2$), dans l'essai ($IIIb_3$), silice et alumine sont précipités séparément. Ils sont ensuite introduits dans le même sac et la disposition générale de l'essai est alors comparable à ($IIIb_2$). La différence essentielle de l'évolution caractérisant l'essai ($IIIb_3$) est une diminution considérable de la mobilité de la silice qui devient environ le 1/5 de celle constatée dans l'essai ($IIIb_2$). La mobilité de l'alumine est aussi considérablement réduite par rapport à ($IIIb_2$). Tout semble se passer comme s'il se produisait dans le sac renfermant le mélange de silice et d'alumine une fixation de la silice par ce dernier élément. Cette hypothèse est confirmée par le fait que l'alumine présente une légère mobilité caractéristique de son association avec la silice et surtout par le fait que l'on n'observe pas de cristallisation de l'alumine mélangée à la silice (courbe III, fig. 6). Rappelons que ce fait est systématique et qu'aucun des coprécipités de silice et d'hydroxyde n'a

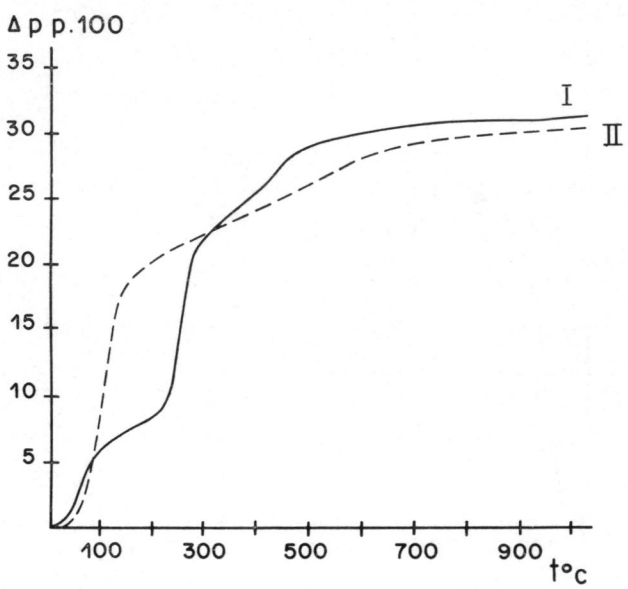


FIG. 7. — *Courbes thermogravimétriques*

I) de l'hydroxyde d'alumine initialement amorphe transformé en un mélange de 40 p. 100 de gibbsite et de 20 p. 100 de pseudoboehmite ; II) du coprécipité Si/Mg en fin d'expérience ; la courbe montre une légère tendance à l'organisation par un aplatissement de la courbe entre 300° et 600 °C. Cette organisation est déjà visible à l'aide des rayons X sur le produit initial.

Thermogravimetric curves

I) of the Al hydroxide (amorphous material at starting) transformed in a mixture of gibbsite (40 p. 100) and pseudoboehmite (30 p. 100) ; II) of a coprecipitated Si/Mg at the end of the experiment ; the curve shows a little tendance to organization (flattening of the curve between 300° and 600 °C). This organization is already apparent by X-ray diffraction on the initial substance.

montré, au cours de son vieillissement, une cristallisation de l'hydroxyde (courbe I, fig. 6).

Nous avons voulu compléter cette série d'observations en étudiant le comportement d'un coprécipité de silice et d'hydroxyde de magnésium placé dans un sac vis-à-vis d'un précipité d'hydroxyde d'alumine placé dans un autre sac (IIIc). Dans ces conditions, la mobilité de la silice est très faible et représente 7 p. 100 de la quantité introduite. Il en va de même pour celles de la magnésie qui est de 2 p. 100, et de l'alumine qui reste très faible ; enfin le contenu du sac n'évolue pas (courbe II, fig. 7). Ce résultat signifie que la stabilité de la liaison Si — Mg est relativement grande. Elle apparaît comme le corollaire de la tendance que présente le magnésium à migrer vers le sac renfermant la silice comme l'a montré l'essai (IIa_2). Rappelons également que dans nos essais antérieurs, nous avions constaté que l'halloysite se dissociait au voisinage d'un sac renfermant du carbonate de magnésium pour former de l'hydrotalcite alors que les antigorites en présence d'alumine restaient pratiquement inchangées (Besson, Caillère et Hénin, 1973).

C'est donc bien la stabilité de la liaison Si — Mg qui est en cause puisque dans un autre essai, où nous avions mis dans un sac un précipité d'hydroxyde d'alumine fraîchement préparé et, dans un autre sac, du carbonate de magnésium hydraté, il s'était formé une très belle hydrotalcite. Dans l'essai (IIIc), l'hydroxyde d'alumine cristallise sur place (courbe I, fig. 7).

IV. — Comportement des hydroxydes

L'ensemble de ces résultats permet de mettre en évidence l'inhibition de la cristallisation des hydroxydes quand ils sont associés à la silice. D'une part, le précipité d'hydroxyde de fer seul (*Ia*) a presque complètement évolué en goethite (courbe I, fig. 2) alors qu'aucun des gels Si-Fe n'a montré d'évolution sensible (*Ib*) (courbe II, fig. 2) et ($IIIb_1$) (courbe III, fig. 4).

D'autre part, dans tous les cas où la silice est venue s'associer à l'hydroxyde de fer, si celui-ci a montré une certaine cristallinité, il apparaît que seule une fraction de 40 à 60 p. 100 de cet élément a cristallisé (courbe III, fig. 2) (Ic) (courbe II, fig. 6) ($IIIb_2$).

Toutefois, il n'y a pas de liaison étroite entre la quantité d'hydroxyde formé et les quantités de silice ou d'alumine ayant pénétré dans les sacs ne renfermant qu'un hydroxyde, mais ceci n'est pas surprenant étant donné que toutes les expériences n'ont pas la même durée. D'autre part, il est difficile d'évaluer séparément l'action que la silice et l'alumine peuvent avoir sur l'évolution de l'hydroxyde de fer. Ces résultats confirment, par une méthode différente, ceux obtenus par Pédro et Melfi (1970) qui ont montré qu'un lessivage intense par de l'eau plus ou moins chargée de CO_2 était nécessaire pour provoquer soit la cristallisation de gels ferriques par désionisation, soit celle de gels silicoferriques par désilicification.

Les mêmes remarques peuvent être faites pour la silice et l'alumine puisque, dans aucun des gels silicoalumineux, il n'y a cristallisation de l'alumine sous forme d'hydroxyde (courbe I, fig. 6) ($IIIa_2$). Le simple mélange des deux gels dans un même sac produit le même effet (courbe III, fig. 6). Par contre, si l'alumine se trouve dans un sac séparé ayant servi de piège à la silice (courbe II, fig. 5) ($IIIa_2$) (courbe I, fig. 7) ($IIIa_1$),

une fraction, qui a varié de 40 à 60 p. 100, a cristallisé sous forme de gibbsite ou de gibbsite et de boehmite.

V. — Conclusion

Il importe de faire une réserve quant aux explications que l'on peut déduire de ces essais. Nous discutons de ces résultats en tenant compte des éléments chimiques mis en expérience mais il est très difficile de tenir compte du pH. En effet, bien que l'on se soit efforcé d'amener les matériaux à un pH donné lors de la coprécipitation des gels, celui-ci évolue très sensiblement au cours des essais. Les procédés qui auraient permis de mieux définir les matériaux initiaux, comme la dialyse ou des lavages prolongés, auraient amené, eux aussi, une variation incontrôlée du pH avec par surcroît une modification de la composition chimique. Nous avons donc préféré utiliser les matériaux tels quels, c'est-à-dire avec la composition chimique que nous avions souhaitée.

Un premier fait essentiel a été mis en évidence : quand un gel de silice et un gel d'hydroxyde sont introduits séparément, la silice se fixe sur l'hydroxyde en l'immobilisant sans toutefois inhiber complètement sa cristallisation. Si au contraire, silice et hydroxyde sont coprécipités, l'hydroxyde alors devient mobile mais ne cristallise plus. Cependant, la teneur finale en silice du sac renfermant initialement l'hydroxyde à l'état pur est du même ordre de grandeur que dans certains coprécipités. C'est donc vraisemblablement à une organisation différente des constituants que l'on peut attribuer une cristallisation partielle de l'hydroxyde. Ce dernier phénomène peut s'interpréter en admettant que la fixation de la silice sur une partie de l'hydroxyde protège l'autre fraction de celui-ci, qui peut alors cristalliser. Cette hypothèse implique que le processus de fixation de la silice soit limité. Il semble que ce soit le cas, car il n'existe pas de corrélation entre quantité de silice fixée et durée des expériences, du moins quand celles-ci ont eu une durée supérieure à quelques mois.

Ces conclusions rejoignent celles de Pédro et Melfi (1970) qui ont montré la nécessité du lessivage des gels ferriques ou silicoferriques pour permettre la cristallisation des oxyhydroxydes de ce cation.

Bien que le déplacement de la silice vers les sacs renfermant des hydroxydes purs témoigne de l'affinité de ces substances, leur liaison est toutefois beaucoup moins stable que celle qui peut se former entre la silice et les cations divalents, tels que le nickel et plus encore le magnésium. Cette affinité est d'ailleurs telle que même un minéral cristallisé comme l'halloysite se dissocie en présence d'un sel de magnésium peu soluble (Besson, Caillère et Hénin, 1973).

On peut donc concevoir que dans un mélange de gels, il puisse exister une première étape pendant laquelle la silice soit captée par des hydroxydes libres et que, dans un deuxième temps, celle-ci soit remise en mouvement du fait de la venue d'ions tels que le magnésium avec lesquels elle contracterait de nouvelles combinaisons. Il pourrait donc se constituer des réserves temporaires de silice disponibles pour entrer dans d'autres combinaisons en fonction de l'évolution du milieu. C'est un mécanisme de ce genre qui a été évoqué pour expliquer la formation de nontronite dans les sédiments récents du lac Tchad (Pédro, Carmouze et Velde, 1978).

Reçu pour publication en février 1980.

Summary

Behavour of Al and Fe ions in presence of silica and divalent ions

The authors intend to confirm with silicoaluminous and silicoferric gels in presence of alumina or iron gel results previously obtained with other materials. The experiments consist in placing separately in dialyse bags soaked in deionized water substances liable to react upon each other to give new compounds. The products obtained generally appear inside the bags near to the less soluble substances.

These results are confirmed. It appears in particular that if precipitates of iron or alumina hydroxides are placed alone they cristallised on the spot as oxide or hydroxide. If silica has been introduced this evolution is inhibited.

On the contrary, if one introduces coprecipitates of silica and hydroxide in the bags, the hydroxide does not crystallise but gains a certain mobility.

Lastly if one introduces in a bag a coprecipitated gel and in another one hydrated magnesium carbonate there is a dissociation of the coprecipitated substance and silica associates with magnesium.

Zusammenfassung

Verhalten der Al und Fe Ionen in Gegenwart von Kieselerde und zweiwertigen Kationen

Die Autoren beabsichtigen die Ergebnisse, die mit anderen Materialen vorher erzielt wurden, mit Ferri- und Aluminiumoxidsilikagel in Gegenwart von Aluminiumoxid- oder Eisengel zu bestätigen. Die Versuche bestehen darin, Substanzen einzeln in Dialysebeutel einzuführen, die in deionisiertes Wasser getaucht sind. Diese Substanzen sind fähig, aufeinander zu reagieren und so neue Verbindungen zu ergeben. Im allgemeinen entstehen die so erhaltenen Produkte innerhalb der Beutel, in der Nähe der am wenigsten löslichen Substanzen.

Diese Ergebnisse werden bestätigt. Man kann im besonderen beobachten, dass allein eingeführte Eisen- oder Tonerdehydroxidniederschläge an Ort und Stelle als Oxid oder Hydroxid kristallisieren. Hat man aber Kieselerde eingeführt, so wird diese Entwicklung gahemmt.

Wenn man dagegen zusammengefällte Kieselerde und Hydroxid in die Beutel einführt, so kristallisiert das Hydroxid nicht, sondern erlangt sogar eine gewisse Beweglichkeit.

Führt man nun ein zusammengefälltes Gel in einen Beutel ein, und in einen anderen wasserhaltiges Magnesiumcarbonat, so löst sich der Gesamtniederschlag auf und die Kieselerde verbindet sich mit dem Magnesium.

РЕЗЮМЕ

Поведение ионов Al и Fe в присутствии кремнезема и двухвалентных катионов.

Г. БЭССОН, С. КАЕР, С. ГЕНЭН.

С помощью силикожелезных и силикоалюминиевых гелей в присутствии гелей глинозёма или железа авторы хотели подтвердить результаты, полученные ранее с другими материалами. В мешки для диализа, погруженные в очищенную воду, помещают вещества, способные взаимодействовать и дать новые соединения. Вообще продукты образуются в мешках недалеко от наименее растворимых веществ.

Опыты подтверждают эти результаты. В особенности, когда их помещают отдельно, осадки гидроокисей железа и глинозёма кристаллизуются на месте в форме окиси или гидроокиси. Процесс тормозится когда прибавдяют кремнезём.

Напротив, гидроокись не кристаллизуется и приобретает определённую подвижность, когда помещают в мешки соосадки кремнезёма и гидроокиси.

Наконец соосадок разлагается и кремнезём соединяется с магнием, когда помещают в первый мешок соосаждённый гель и в другой мешок гидратированный карбонат магния.

Références bibliographiques

BESSON H., CAILLÈRE S. et HÉNIN S., 1973. Conditions de formation de divers hydrocarbonates voisins de l'hydrotalcite. *Bull. Gr. fr. Argiles* **XXVI,** 79-89.

BESSON H., CAILLÈRE S. et HÉNIN S., 1975. Evolution de quelques silicates phylliteux en présence de composés magnésiens peu solubles. *C. R. Acad. Sci.* **281** D, 863-865.

BESSON H., CAILLÈRE S. et HÉNIN S., 1977. Exemples de réactions à basse température dans des milieux aqueux confinés à partir de matériaux solides. *C. R. Acad. Sci.* **285** D, 1371-1373.

BESSON H., CAILLÈRE S. et HÉNIN S., 1977. Modalités des néogenèses dans des systèmes hétérogènes renfermant des phases peu solubles. *Clay Miner.* **12,** 239-244.

BÉTREMIEUX R., 1951. Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. agron.*, 193-295.

HÉNIN S. et PÉDRO G., 1978. Rôle de l'hétérogénéité du milieu sur les modalités de l'altération. *Science du Sol, nº spécial Séminaire AFES. Altération des roches* (sous presse).

PÉDRO G. et MELFI A. J., 1970. Recherches expérimentales sur le comportement des hydrates ferriques et des constituants silicoferriques amorphes en milieu lessivé. *Pédologie* **XX,** Gand, 5-33.

PÉDRO G., CARMOUZE J. P. et VELDE B., 1978. Peloïdal nontronite formation in recent sediments of Tchad Lake. *Chemical Geology* **23,** 139-149.

Ann. agron., 1980, **31** (3), 273-283.

Le transfert de l'eau dans la plante en régime transitoire

G. LASCÈVE et Ph. COUCHAT

Service de Radioagronomie,
Centre d'études nucléaires de Cadarache,
B. P. 1, 13115 *Saint-Paul-lez-Durance*

Résumé

Une façon d'étudier les mécanismes de régulation hydrique chez la plante consiste à déterminer l'évolution du bilan hydrique instantané à la suite d'un déséquilibre créé par une modification de l'environnement. Une telle approche n'est possible que sur plante entière, et à condition de pouvoir mesurer de façon continue la transpiration et l'absorption racinaire.

Nous avons développé un dispositif expérimental permettant d'effectuer les deux mesures à 0,1 µl près, quelles que soient les conditions imposées à la partie aérienne ou aux racines.

Après avoir décrit de façon détaillée la cellule de mesure, nous donnons trois exemples de modification-type de l'environnement aérien, l'environnement racinaire restant constant ; passage nuit-jour, passage air-air sans CO_2 et enfin modification de la température ambiante. A partir des courbes de transpiration et d'absorption obtenues, nous déduisons les courbes d'évolution du bilan hydrique instantané que nous comparons au modèle théorique proposé par Weatherley.

Introduction

Les transferts d'eau dans la plante sont étroitement dépendants des interactions métaboliques qui existent entre les différents organes (Blanchet et Gelfi, 1978). Ainsi pour le Tournesol, Mingeau et Robelin (1972), puis Morizet (1975) ont montré certaines relations entre racines et parties aériennes à la suite d'un déséquilibre hydrique consécutif à une carence azotée, associée ou non à une anoxie racinaire. De son côté, Frossard (1976), sur Tournesol également, a montré comment la respiration des racines qui contrôle l'absorption (Greenwood, 1967) peut être reliée au métabolisme des parties aériennes.

Ces exemples soulignent l'intérêt des expériences sur plante entière lorsque l'on veut étudier les mouvements de l'eau. On ne trouve cependant qu'un nombre relativement limité de travaux qui, par le biais de mesures simultanées de l'absorption et de la transpiration, analysent l'évolution des flux d'eau à l'occasion d'une modification d'environnement. C'est le cas des études sur Tournesol mentionnées ci-dessus, qui reprennent la méthodologie proposée par Ehrler (1966) pour le coton ; mais aussi des expériences de Shirazi *et al.* (1976) sur le coton, de Brunner et Eller (1974) sur poivre et de Johnsson (1973) sur plantules d'avoine. La limitation commune à ces

recherches est que d'abord seul le passage nuit-jour est envisagé et qu'ensuite, le délai entre deux mesures est long (entre 5 et 30 min.).

A cette démarche expérimentale s'est ajoutée une approche théorique dont le point de départ est le modèle de transfert d'eau dans la plante proposé par Weatherley (1970), repris par Jarvis (1974) et Cruiziat (1978). Remettant en cause l'idée émise en 1937 par Kramer selon laquelle le déficit hydrique est lié au retard de l'absorption sur la transpiration, Weatherley considère que, le courant d'eau empruntant un trajet de moindre résistance le long des parois cellulaires, l'absorption répond immédiatement à toute variation de transpiration, mais qu'elle est modulée par le flux d'eau interne issu des cellules. Ce flux est sollicité par la différence de potentiel qui s'établit entre courant de transpiration et vacuoles indépendamment du retard de l'absorption sur la transpiration. Le modèle n'a pas été, à notre connaissance, confronté à l'expérience.

L'étude que nous présentons a donc un double but : décrire une méthodologie, basée sur la mesure fine et continue de l'absorption et de la transpiration, permettant l'étude des flux d'eau dans une plante entière soumise à des variations contrôlées d'environnement, spécialement en ce qui concerne les gaz ; confronter les premiers résultats obtenus avec le modèle théorique proposé par Weatherley.

I. — Matériel et méthode

Matériel végétal

Les expériences sont réalisées sur Tournesol (*Hélianthus Annuus* L.) variété naine I.N.R.A. 6501, âgé de 15 à 20 jours. Les plants sont préparés sur sable grossier en chambre de culture. L'éclairage (78 Wm^{-2}) est fourni par des tubes fluorescents (Sylvania Gro-Lux) pendant 14 h. La température et l'humidité relative sont respectivement de 25 °C et 50 p. 100 le jour, de 20 °C et 75 p. 100 la nuit. Deux fois par jour, les pots sont arrosés à refus avec de la solution nutritive pendant les 5 min qui précèdent et qui suivent la période d'éclairement. Quelque 70 h avant l'expérience, le plant choisi est extrait du pot puis installé en culture hydroponique dans la cellule de mesure. Toutes les expériences sont effectuées en fin de nuit, le matin vers 9 h (heure légale).

Cellule de mesure

La cellule de mesure est construite de telle sorte qu'il soit possible d'enregistrer simultanément et en continu la transpiration et l'absorption quelles que soient les conditions d'environnement que l'on impose aux racines ou à la partie aérienne (fig. 1).

Elle se compose de deux compartiments indépendants associés par une interface en acier inoxydable : l'un cylindrique de 0,3 l est destiné aux racines, l'autre sphérique de 4 l aux feuilles. La tige du plant expérimenté traverse de façon étanche (Terostat) cette interface et constitue la seule communication entre les deux compartiments. La température du milieu racinaire est fixée (25 °C) et la solution nutritive, exempte de bulle d'air, circule entre ce récipient et un réservoir maintenu à la même température

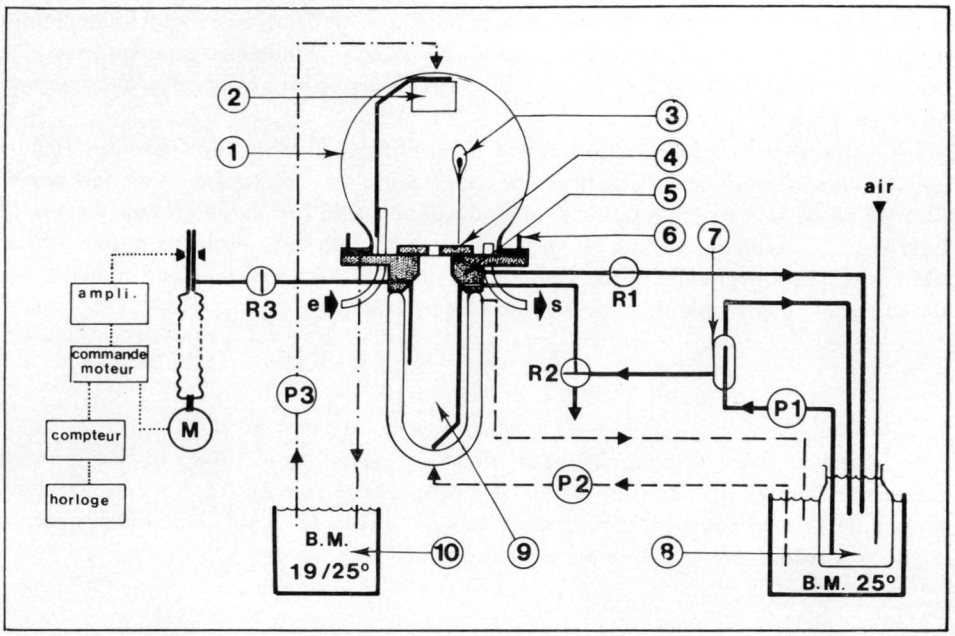


FIG. 1. — *Schéma simplifié de l'ensemble expérimental.*

1) Compartiment « Feuille » ; 2) Microventilateur ; 3) Thermocouple ; 4) Plaque support de la plante ; 5) Interface ; 6) Gouttière de récupération de l'eau de ruissellement ; 7) Dispositif anti-bulle d'air ; 8) Réservoir de solution nutritive à température constante ; 9) Compartiment « Racine » 10) Bain-marie déterminant la température du compartiment « Feuille ». e. s. : entrée et sortie du gaz de balayage ; P_1, P_2, P_3 : pompes de circulation ; R_1, R_2, R_3 : robinets ; M : ensemble Moteur pas à pas-réducteur-vis micrométrique. —►— Circuit solution nutritive. — —► Circuit thermorégulation compartiment racine. — · —► Circuit thermorégulation compartiment feuille.

Schematic diagram of experimental setup.

1) Leaf chamber ; 2) Microventilator ; 3) Thermocouple ; 4) Plant support ; 5) Interface ; 6) Water collector ; 7) Anti air-bubble device ; 8) Nutrient solution tank at constant temperature ; 9) Root cell ; 10) Water bath for leaf chamber temperature regulation. e. s. : inlet and outlet of gas ; P_1, P_2, P_3 : Water pump ; R_1, R_2, R_3 : stopcock ; M : step by step motor, reducing gear and micrometric screw. —— Nutrient solution. — — Thermoregulation circuit for root compartment. · — · — Thermoregulation circuit for leaf chamber.

où elle est constamment aérée. La température du compartiment feuille est réglée à son point de consigne à $\pm$ 0,5 °C au moyen d'un film d'eau qui ruisselle sur sa face extérieure. La teneur en eau de l'air ou du gaz qui alimente la cellule est maintenue constante (9,2 mg/l) au moyen d'un humidificateur et d'un réfrigérant dont la température est fixée au point de rosée voulu. L'humidité relative à l'intérieur de la cellule dépend de la quantité d'eau apportée par la transpiration. Le débit d'air est régulé (600 l/h). Un microventilateur (débit nominal 400 l/mn) placé en partie haute de l'enceinte assure un vent de quelques mètres par seconde ce qui réduit au minimum la résistance au transfert d'eau due à la couche limite et garantit une bonne homogénéité de l'atmosphère. Excepté pendant les expériences, les conditions d'éclairage, de photopériode, de température sont identiques à celles régnant en chambre de culture. La solution nutritive est également la même que celle utilisée pour l'arrosage des plants pendant la période de croissance.

Il est possible d'adapter facilement et rapidement la forme du compartiment feuille au port du plant étudié (sphérique pour un tournesol, cylindrique pour un maïs), ou encore de travailler sur plante en pot mais dans ce cas, la mesure d'absorption ne peut pas être envisagée.

La présence de plusieurs ensembles humidificateur-réfrigérant permet de changer l'environnement gazeux de la plante (par exemple : remplacement de l'air par de l'air privé de CO_2) sans modification ni du débit ni de la teneur en eau du gaz de balayage. L'inertie du système est faible : compte tenu du débit d'air utilisé (600 l/h) on obtient 2,5 renouvellements par minute. De même un changement de température du compartiment feuille de 5 °C est réalisé en 4 min.

Mesure de la transpiration

Le gaz quittant le compartiment « feuille » passe sur un hygromètre à sonde capacitive (Shaw), puis dans un débitmètre à flotteur (Krohne). Connaissant la teneur en eau de l'air à l'entrée et à la sortie de la cellule et le débit, on en déduit la quantité d'eau transpirée par la plante par unité de temps.

Mesure de l'absorption

Pour effectuer les mesures d'absorption, le compartiment « racine » est isolé du reste du circuit (fermeture du R_1 et R_2) puis mis en communication (ouverture de R_3) avec un dispositif de mesure automatique constitué d'une part d'un court capillaire vertical (section 0,2 mm²) muni en son milieu d'un détecteur de niveau et d'autre part d'un soufflet en acier inoxydable (Tombac) rempli de solution nutritive. Ce soufflet est comprimé par un ensemble moteur pas à pas réducteur vis micrométrique. Chaque passage du ménisque en dessous du niveau du détecteur commande la rotation du moteur pas à pas et l'injection d'un volume de solution nutritive ; ce volume, déterminé par le rapport de réduction et le diamètre du capillaire, est de 1 μl/pas. Chaque injection est comptabilisée et une horloge déclenche l'impression du nombre total d'injections ayant eu lieu pendant la période de temps prédéterminée puis la remise à zéro du compteur. Cette période peut-être ajustée à la vitesse du phénomène attendu ; elle est généralement de 60 s.

Précision

Transpiration.

La transpiration T est calculée selon l'expression suivante :

$$T = \{ [H_2O]_s - [H_2O]_e \} D$$

où $[H_2O]_e$ et $[H_2O]_s$ représentent les concentrations en eau du gaz de balayage à l'entrée et à la sortie de la cellule respectivement et D le débit gazeux. La précision des débitmètres utilisés est de 2 p. 100, celle de l'hygromètre est de 3 p. 100. L'erreur relative sur la transpiration est de 5 p. 100.

Absorption.

Si N est le nombre d'injections, V le volume unitaire injecté et t la période de mesure considérée, l'absorption est donnée par

$$A = \frac{N.V.}{t}$$

Pour les débits rencontrés, l'erreur commise sur N est nulle, celle commise sur t est négligeable ; seule reste une erreur sur V, déterminée lors de l'étalonnage de l'appareil ; elle est de 1 p. 100 et par suite :

$$\frac{\Delta A}{A} = \pm 1 \text{ p. } 100 .$$

Par contre, durant la période d'impression et de remise à zéro du compteur (600 ms maximum) celui-ci est inopérant, ce qui peut provoquer la perte d'une impulsion au maximum. Enfin puisque l'on n'enregistre que des quantités entières, toute fraction de μl sera perdue pour la minute considérée mais prise en compte dans la minute suivante. Pour tenir compte de ces deux erreurs possibles, la valeur réelle de l'absorption est calculée par un lissage sur trois mesures :

$$\overline{A_t} = \frac{A_{t-1} + 2\,A_t + A_{t+1}}{4} .$$

Nombre d'expériences

Un plant de Tournesol pouvant croître en cellule pendant 2 ou 3 semaines à condition de renouveler régulièrement le stock de solution nutritive, chaque expérience a été répétée plusieurs fois soit sur un même plant soit sur plusieurs.

II. — Résultats

Transpiration et absorption

Les figures 2, 3 et 4 présentent la réponse du Tournesol à trois types de variation rapide de l'environnement aérien. Il s'agit respectivement d'un passage nuit-jour à température constante, d'une suppression de CO_2 à l'obscurité et d'une élévation de 5 °C de la température ambiante en 4 min à l'obscurité.

A l'éclairement, la transpiration augmente selon un processus rapide suivi, à partir de 25 mn, d'un processus lent par lequel elle tend de façon monotone vers une valeur limite maximale (fig. 2). L'absorption suit la transpiration avec un retard d'environ 3 min ; vers la 20e minute, elle la dépasse pour revenir finalement au même niveau. On observe une évolution analogue à l'occasion d'une suppression du CO_2 à l'obscurité, mais la variation du flux transpiratoire est plus lente (fig. 3).

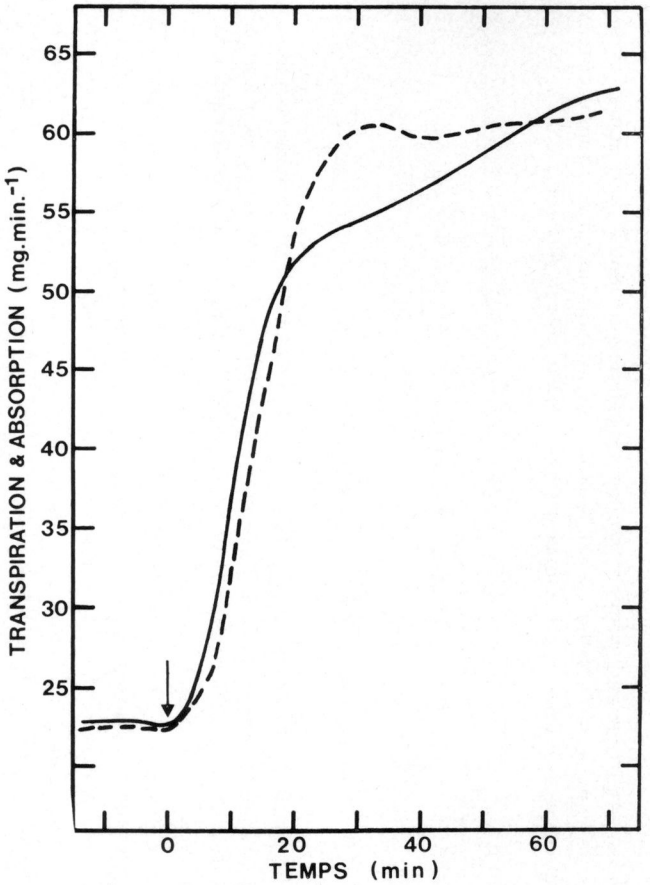


FIG. 2. — *Evolution de la transpiration et de l'absorption, lors d'un éclairage à température constante.* —— Transpiration ; ---- Absorption.

Transpiration and absorption behaviour following illumination at constant temperature. —— Transpiration rate ; ---- Absorption.

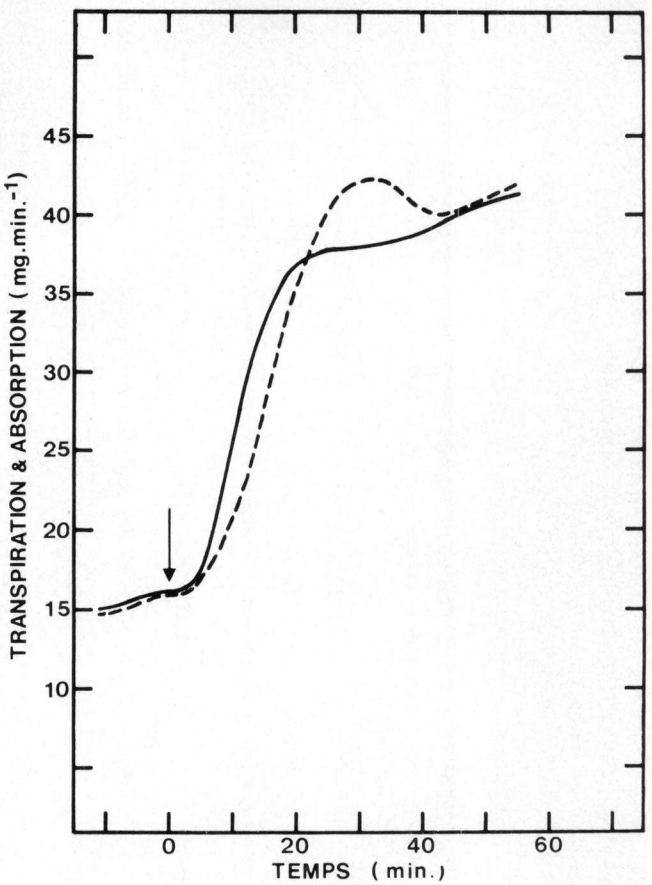


FIG. 3. — *Evolution de la transpiration et de l'absorption lors d'une suppression de CO_2 à l'obscurité.* —— Transpiration ; ---- Absorption.

Transpiration and adsorption behaviour when CO_2 is suppressed in darkness. —— Transpiration rate ; ---- Absorption.

L'élévation de température ambiante (fig. 4) donne lieu à une réaction totalement différente : l'augmentation de transpiration s'accompagne d'un régime oscillatoire dont la période se situe autour de 30 min ; après plus de 1 h on retrouve un niveau de transpiration voisin du niveau de départ. L'absorption évolue de manière identique avec, comme pour les précédentes expériences, un déphasage de près de 3 min. Le premier équilibre entre la transpiration et l'absorption intervient 16 min après le début de l'essai.

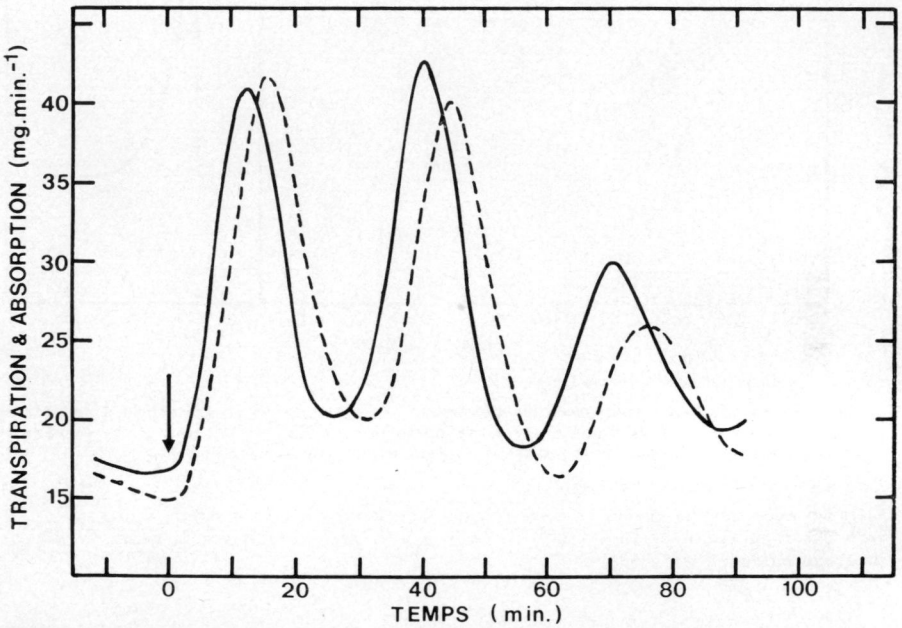


FIG. 4. — *Evolution de la transpiration et de l'absorption lors d'une élévation de température de 5 °C à l'obscurité.* —— Transpiration ; – – – – Absorption.

Transpiration and absorption behaviour when air temperature is increased of 5 °C in darkness. —— Transpiration rate ; – – – – Absorption.

Bilan hydrique instantané

Par différence entre transpiration et absorption, on calcule les courbes représentatives du bilan hydrique instantané de la plante, q_i, pour ces trois traitements (fig. 5). L'éclairement et la suppression de CO_2 à l'obscurité conduisent à une évolution analogue de q_i. Cette variation s'annule au bout d'une seule alternance de 45 min de période environ, tandis que le premier maximum est atteint vers 12 min. L'élévation de température à l'obscurité se traduit par contre par un régime oscillatoire entretenu du bilan hydrique instantané de 28 min de période : le premier maximum est atteint vers 8 min.

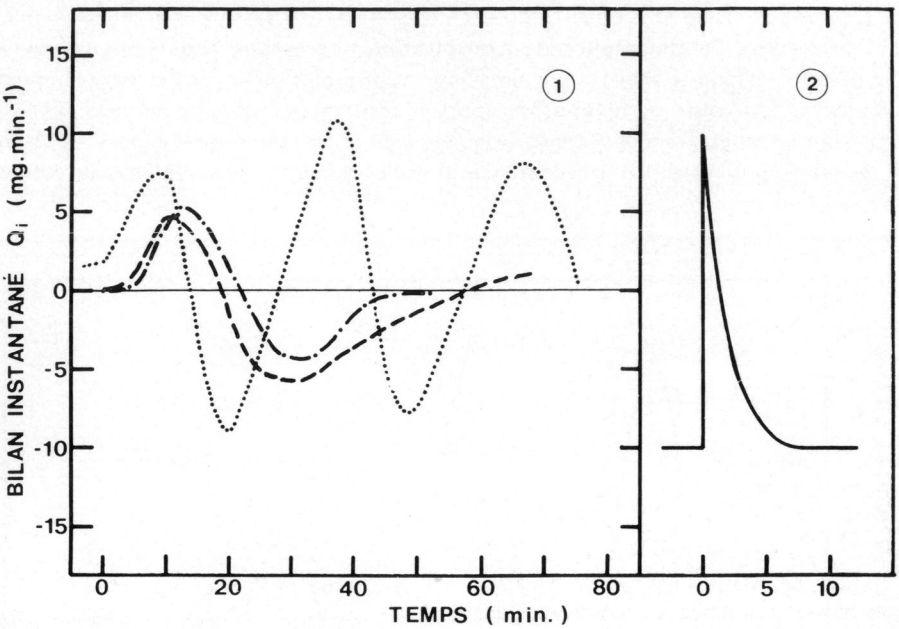


FIG. 5. — *Evolution du bilan hydrique instantané.*

1) D'après les courbes expérimentales obtenues : ——— lors d'un éclairage à température constante ; —·—·—·— lors d'une suppression nocturne de CO_2 ; ····· lors d'une élévation de température à l'obscurité. 2) D'après le modèle théorique de Weatherley.

Instantaneous water balance behaviour.

1) From experimental curves : ——— when light on at constant temperature ; —·—·—·— with CO_2 suppression in darkness ; ····· with a 5 °C step in darkness. 2) From Weatherley's theorical model.

III. — Discussion

La mesure en continu de la transpiration et de l'absorption permet de préciser les résultats que d'autres auteurs ont obtenus avec des pas de temps plus importants. Elle permet la mise en évidence de phénomènes rapides comme ceux montrés à la suite d'une élévation de température à l'obscurité difficiles à soupçonner avec un pas de mesure trop long (Brunner et Eller, 1974 ; Ehrler *et al.*, 1966). Mais surtout, grâce aux dimensions de la cellule et au dispositif de changement rapide de gaz de balayage, on a élargi le domaine expérimental par rapport aux études précédemment citées (Shirazi *et al.*, 1976 ; Johnsson, 1973).

Lors d'un passage nuit-jour, l'équilibre entre transpiration et absorption s'établit plus rapidement dans notre étude que dans celle de Mingeau et Robelin (1972), bien que les Tournesols utilisés soient de même variété. Cet écart peut s'expliquer par des différences dans les conditions expérimentales et les taux de transpiration par unité de surface : 50 mg/mn.dm² dans notre cas contre 17 mg/mn.dm² dans le leur.

La similitude d'évolution du bilan hydrique instantané q_i lors d'une ouverture sous lumière ou à la suite d'une suppression de CO_2 à l'obscurité confirme l'action d'un même mécanisme de régulation hydrique non directement photodépendant.

Le modèle théorique de Weatherley (1970) prévoit que pour une augmentation brutale du courant de transpiration q_t, le flux interne q_i doit augmenter instantanément et que l'absorption q_a doit évoluer de telle sorte que $q_a + q_i$ reste égal à q_t. Le flux interne q_i diminue ensuite exponentiellement pour atteindre zéro au bout d'un temps évalué à 7 min pour des plantes à tiges courtes ; q_a tend alors vers q_t (fig. 5). Dans les trois exemples présentés ci-dessus, l'évolution du flux interne ou bilan hydrique instantané q_i est différente de celle prévue par le modèle ; l'absorption et le flux interne augmentent plus lentement et le premier maximum de q_i n'est obtenu qu'au bout de 8 ou 12 min selon le type d'essai ; q_i diminue ensuite rapidement, s'annule vers 14 ou 20 min, passe par un minimum et tend ensuite vers zéro. Le délai entre le maximum de q_i et son premier passage par zéro est de l'ordre de celui prévu par le modèle ; environ 8 min pour les deux premières expériences. La montée relativement lente de q_i peut s'expliquer si l'on considère que le courant de transpiration et donc le gradient de potentiel entre celui-ci et les vacuoles des cellules ne s'établit que progressivement puisque l'ouverture stomatique quoique rapide n'est pas instantanée. L'inversion du sens du flux interne q_i serait liée à une diminution de la résistance racinaire si l'on admet comme Weatherley (1970) que la résistance à q_i reste constante et que la résistance stomatique tend, ainsi que le montre la courbe d'évolution de la transpiration, à diminuer.

La comparaison des courbes de bilan hydrique instantanée q_i avec les courbes de transpiration montre que le premier maximum du flux interne coïncide avec le point d'inflexion de la courbe de transpiration. Puisqu'aucun facteur ne limite l'absorption d'eau par les racines, ce point d'inflexion traduit probablement la réponse à un mécanisme stomatique autonome comme semble le confirmer les résultats obtenus sur plantes avec ou sans racines par Mingeau et Robelin (1972).

Enfin dans le cas d'une élévation rapide de la température ambiante à l'obscurité, on remarque que l'évolution du flux interne est sensiblement différente : l'allure oscillatoire est conservée mais la période est plus courte et l'amortissement beaucoup plus faible. Il semble que le mécanisme de régulation stomatique, directement influencée par ce que l'on peut considérer comme un choc thermique, soit le facteur principal du contrôle du flux interne.

Reçu pour publication en février 1980.

Summary

Water transfer in plant

Investigating the water regulation mecanism in plant leads to determine the instantaneous water balance just after an environmental condition modification. Such studies must be conducted on intact plants and measuring continuously leaf transpiration and water absorption by roots.

An experimental cell is presented which allows to measure simultaneoulsy these two parameters with a precision of 0.1 μl whatever the aerial and root conditions.

After detailed description of the measurement cell three examples of typical environmental condition modification on Sunflower are shown. 1) Light-on at constant temperature ; 2) CO_2 elimination in darkness at constant temperature ; 3) Fast rise of ambiant temperature in darkness and normal air. During all these modifications of atmosphere environment, roots stay in constant condition. Difference between transpiration and absorption curves provides the evolution curve of instantaneous water balance which is compared to the Weatherley's theoretical curve.

Zusammenfassung

Wassertransport Innerhalb der Pflanze bei ubergangsverhaltnisse

Um die Mechanismen der Wasserregulierung in der Pflanze zu studieren, kann man zum Beispiel die Entwicklung der Momentwasserbilanz nach einer durch eine ungebungs änderung bedingten Gleichgewichtsstörung bestimmen. Solche Annäherungsversuche sind nur möglich auf der ganzen Pflanze und unter der Bedingung dass Ausdunstung und Wurzelabsorption ununterbrochen gemessen sein können.

Wir haben eine Untersuchungsvorrichtung ausgearbeitet, die beide Messungen bis auf 0,1 µl zu machen ermöglichen, wie die auf den oberirdischen Teil oder Wurzel angewandten Bedingungen auch sein mögen.

Nach einer ausgeführten Beschreibung der Messzelle werden drei Beispiele für die Musteränderung der Luftumgebung bei ungeändertez Wurzel-Umgebungegeben : Ubergang von Nacht zu Tag, Ubergang von Luft zu Luft ohne CO_2, und letzlich Anderung der Umgebungstemperatur. Von den erteilten Transpirations — und Absorptionskurven können wir die Entwicklungskurve der Momentwasserbilanz ableiten, die wir mit dem theroetischen Muster von Weatherley vergleichen.

РЕЗЮМЕ

Перенос воды растений в переходном режиме.

Г. ЛАССЕВ, П. КУША.

Определение развития моментального баланса воды после нарушения равновесия, вызванного изменением окружающей среды, позволяет изучить механизм регулирования воды растений. Такой подход возможен только с целыми растениями и с условием, чтобы измерились непрерывно испарение и всасывание корней.

Вырабатывалось экспериментальное устройство для измерения обеих величин с точностью 0,1 мкл во всевозможных условиях существования корней и надземной части растений.

После подробного описания измерительной камеры, представляются 3 примера изменений воздушной среды (окружающая среда корней остаётся неизменимым) : переход ночьдень, переход воздух-воздух без CO_2, изменение температуры. С помощью полученных кривых испарения и всасывания строятся кривые развития/моментального водного оаланса, которые сравниваются с теоретической моделью Уитерли.

Références bibliographiques

BLANCHET R., GELFI N., 1978. Relations entre développement foliaire, transpiration et production chez le soja. *Ann. agron.* **29** (3) 223-242.

BRUNNER U., ELLER B. M., 1974. Öffnen der Stomata beï hoher Temperatur im Dunkeln. *Planta* **121,** 293-302.

CRUIZIAT P., 1978. La circulation de l'eau dans la plante en flux non conservatif : quelques faits et problèmes. *La houille blanche,* 3/4, 243-253.

EHRLER W. L., Van BAVEL C. H. M., NAKAYAMA S., 1966. Transpiration, water absorption, and internal water balance of Cotton plants as affected by light and changes in saturation deficit. *Plant Physiol.* **41,** 71-74.

FROSSARD J. S., 1976. Relations entre l'éclairement des feuilles et l'absorption d'oxygène par les racines chez le Tournesol. (*Helianthus Annuus* L.). *Ann. Agro.* **27** (4), 435-445.

GREENWOOD D. J., 1967. Studies on the transport of oxygen through the stems and roots of vegetable seedlings. *New Phytol.* **66,** 337-347.

JARVIS P. G., 1974. *Water Transfer in Plants in Heat and Mass Transfert in the Biosphere.* Part. I. *Transfer Process in the Plant Environment.* 369-394, de Vries D. A., Afgan N. M., ed., Wiley and sons, New York.

JOHNSSON A., 1973. Oscillatory transpiration and water uptake of Avena Plants. I. Preliminary observations. *Physiol. Plant.* **28,** 40-50.

KRAMER P. J., 1937. The relation between rate of transpiration and rate of absorption of water in plants. *Amer. J. Bot.* **24,** 10-15.

MINGEAU M., ROBELIN M., 1972. Le transfert de l'eau dans la plante : Action particulière de la nutrition azotée. *Ann. agron.*, **23** (4), 419-427.

MORIZET J., 1975. Etude des transferts de l'eau dans la plante. Action comparée d'une alimentation carencée en azote et d'une anoxie en milieu racinaire. Interactions entre ces deux facteurs. *C. R. Acad. Sc. Paris*, **281** D, 1833-1836.

SHIRAZI G. A., STRONE J. F., TODD G. W., 1976. Oscillatory transpiration in Cotton plant. I. Experimental characterisation. *J. Exp. Bot.* **27** 608-618.

WEATHERLEY P. E., 1970. *Some Aspects of Water Relations in Advances in Botanical Research* (3) 171-206 Preston R. D., Woolhouse H. W., éd., Academic Press, London.

Ann. agron., 1980, **31** (3), 285-295.

Influence de la carence hydrique sur le comportement photosynthétique du Lin

J. C. RODE et O. BETHENOD

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A..
78000 *Versailles*

Résumé

Les déficits hydriques sont appliqués pendant une période de 15 jours lorsque la plante atteint 13 cm de haut. Lors de la réhydratation, des mesures d'assimilation nette et de propriétés optiques des feuilles ont été faites, de même que des observations au microscope optique.

Le taux d'assimilation nette est de 20 p. 100 supérieur chez les plantes ayant subi la sécheresse, puis diminue dans les 2 jours suivant la réhydratation jusqu'à devenir inférieur à celui des témoins.

Le coefficient d'absorption des feuilles, de 10 p. 100 supérieur chez les plantes carencées en fin de sécheresse, retombe à la valeur observée chez le témoin, la variation du coefficient d'absorption étant surtout sensible dans les longueurs d'onde comprises entre 0,5 et 0,6 μm.

Les chloroplastes, uniformément répartis dans le volume cellulaire chez les témoins, présentent une localisation polaire dans les cellules des plantes carencées en fin de sécheresse.

On n'a pas observé d'augmentation de matière sèche en réhydratation.

1. — Introduction

L'étude de l'influence d'une sécheresse modérée appliquée pendant une période de 15 jours sur le Lin a récemment mis en lumière le phénomène d'accélération de croissance (Boyer, 1975). D'autres observations sur la Betterave en conditions naturelles avaient déjà montré l'existence d'une phase de compensation partielle ou totale du retard de croissance induit par la sécheresse (Robelin, 1970). Notre étude a eu pour but en reprenant les expériences citées sur le Lin, de suivre la croissance, la photosynthèse et l'évolution des paramètres qui lui sont liés au cours de la réhydratation.

2. — Matériel et méthodes

2.1. — *Conditions de culture*

Le matériel utilisé est un Lin textile, *Linum usitatissimum* L. Var. Reina. Toutes les mesures effectuées au cours de cette étude ont été réalisées sur des plantes issues de la germination d'un lot de graines provenant d'une même récolte d'une année précé-

dente. Les cultures sont faites en serre dans des pots remplis de sable arrosé de solution nutritive. Chaque pot contient trente plantes. L'éclairement se compose de lumière naturelle et d'éclairage d'appoint. Les lampes utilisées sont du type à vapeur de sodium haute pression qui ont l'avantage de ne pas trop rayonner dans l'infrarouge. La durée d'éclairement est fixée à 16 h (plante de jour long).

La température de jour est de 18° et de 15° la nuit, l'éclairement fourni par les lampes étant de 270 Wm^{-2}. L'humidité relative de l'air a varié de 70 à 90 p. 100 pendant l'application de la carence hydrique.

Des pesées journalières des pots témoins (dont les dimensions sont : L = 24 cm ; l = 4,5 cm ; h = 24 cm) permettent de contrôler les pertes par évapotranspiration ; ces pertes sont exactement compensées par des apports de solution nutritive sur le lot témoin, alors que les plantes soumises à la « sécheresse » reçoivent une irrigation limitée à la moitié de ces apports. Sur l'ensemble des 15 jours durant lesquels ces traitements différenciés sont appliqués, l'intensité de sécheresse subie est donc voisine de 0,5. Ainsi pour la culture 3, la perte d'eau par jour et par pot était de 156 g à la mise en sécheresse, de 198 g pour les témoins et 116 g pour les traités au bout de 7 jours, de 217 g pour les témoins et 100 g pour les traités après 15 jours de sécheresse.

Nous n'avons pas réalisé de mesure précise du déficit hydrique des tissus à la suite du protocole d'alimentation en solution nutritive. Néanmoins, des mesures de poids frais et de poids sec nous permettent de dire que la teneur en eau des plantes carencées est environ 80 à 90 p. 100 de celle des témoins, en fin de sécheresse. On a donc une carence peu sévère et l'on peut penser qu'aucune dénaturation structurale ou biochimique irréversible n'a eu lieu.

Les cultures 1, 2 et 3 ont été effectuées respectivement en juillet, septembre et octobre, ce qui explique d'une certaine façon la variabilité obtenue.

2.2. — *Mesure de la photosynthèse*

Les mesures d'assimilation nette sont effectuées dans les chambres d'assimilation définies par Chartier (1971), avec les améliorations suivantes : lampes à vapeur de sodium haute pression, mesure de la température des feuilles par thermocouples placés au contact des feuilles, possibilité de faire des mesures à 1,5 p. 100 d'oxygène.

Quatre plants de Lin d'un même pot sont introduits dans la chambre d'assimilation, ce pot restant à l'extérieur de la chambre. On fait varier la teneur en CO_2 de la chambre et on mesure la photosynthèse nette correspondante de 0 à 300 Vpm.

2.3. — *Mesure des propriétés optiques*

La caractérisation des propriétés optiques des feuilles (absorption, transmission, réflexion) est effectuée avec l'appareil mis au point par Sinclair et Thomas (1970) remanié par Rebella (1974) ; il s'agit essentiellement de la focalisation de la lumière réfléchie ou transmise au moyen d'un miroir hémisphérique, sur un capteur placé symétriquement à la feuille par rapport au centre géométrique du miroir. Les capteurs utilisés permettent des mesures dans les gammes de longueurs d'ondes suivantes : 0,5-0,6 μm ; 0,6-0,7μm ; 0,7-0,8 μm ; 0,8-1,1 μm.

2.4. — *Observations au microscope optique*

Les observations sont réalisées sur des coupes transversales de feuille de Lin. Ces coupes sont montées entre lame et lamelle dans l'eau ; on observe donc des cellules vivantes. Le temps séparant le montage de la coupe dans l'eau de l'observation au microscope n'a pas dépassé 30 s.

3. — Modèle de fonctionnement d'une plante de type C_3

Les paramètres nécessaires à la détermination des échanges gazeux ont été définis par Chartier (1966) et Chartier, Bethenod (1977).

Dans une modélisation des plantes de type C_3, le passage du gaz carbonique depuis l'air extérieur à la feuille jusqu'aux sites de carboxylation s'effectue en plusieurs étapes que l'on a caractérisées par des résistances.

La première est r_a ou résistance à la diffusion du CO_2 dans la couche limite entourant la feuille (phase gazeuse), puis r_s ou résistance à la diffusion du CO_2 à travers les stomates et la cuticule (phase gazeuse) et enfin un terme r_i qui comprend la résistance à la diffusion du CO_2 depuis les espaces intercellulaires jusqu'aux sites de libération du CO_2 correspondant à la photorespiration (r_{m_1}), la résistance au transfert du CO_2 depuis ces derniers sites jusqu'à ceux de carboxylation dans les chloroplastes (r_{m_2}) et enfin r_x qui traduit la résistance à la carboxylation c'est-à-dire l'activité de la Rudp carboxylase.

On démontre qu'en lumière saturante et en CO_2 limitant, l'assimilation nette N est définie par la relation

$$N = \frac{[C_0] - \Gamma}{\sum_r}$$

avec $[C_0]$ = concentration en CO_2 dans l'air,
Γ = point de compensation pour le CO_2 ;
$\sum_r$ = somme des résistances $r_a + r_s + r_i$.

La courbe donnant l'assimilation nette en fonction de la teneur en CO_2 de l'air est donc une droite de pente $1/\sum_r$, ce terme représentant la conductance.

Si l'on porte l'évolution de la conductance en fonction du temps, on aura une bonne image de l'intensité de la photosynthèse au cours de la période de végétation puisqu'une variation de la conductance traduira une variation de la somme des résistances à l'assimilation.

4. — Résultats et discussion

A partir des courbes expérimentales $N = f(C_0)$ dont un exemple est donné figure 1, on obtient :

— une évaluation de la somme des résistances $\sum_r$: la pente étant égale à $1/\sum_r$;

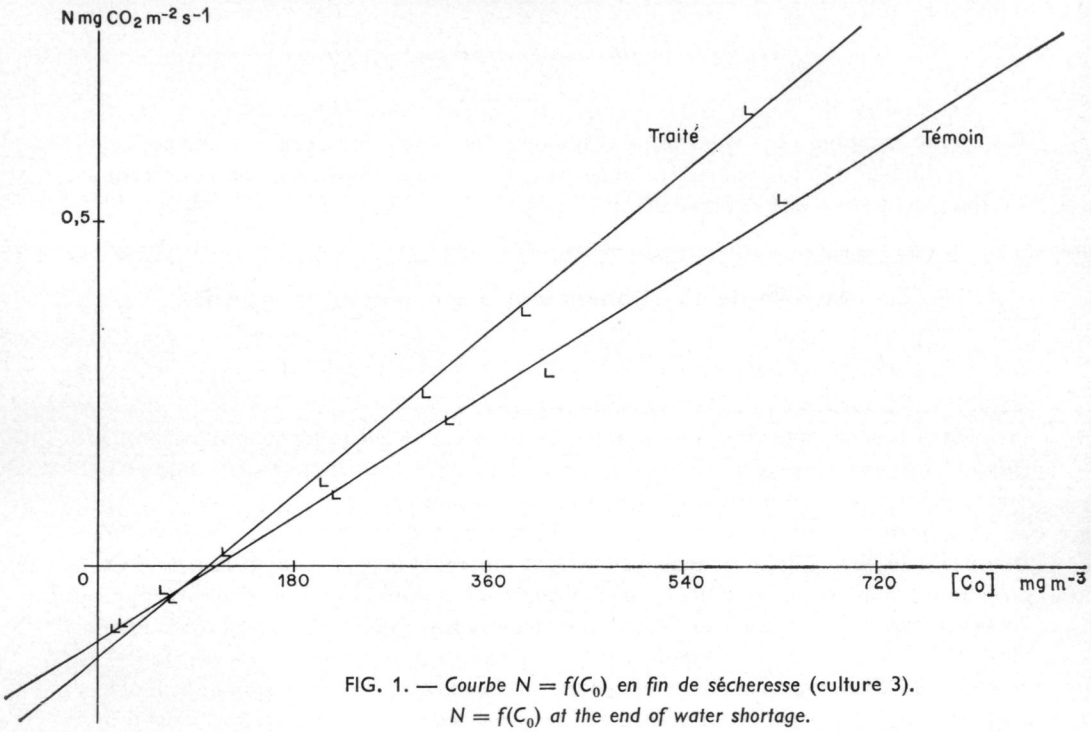


FIG. 1. — *Courbe $N = f(C_0)$ en fin de sécheresse* (culture 3).
$N = f(C_0)$ at the end of water shortage.

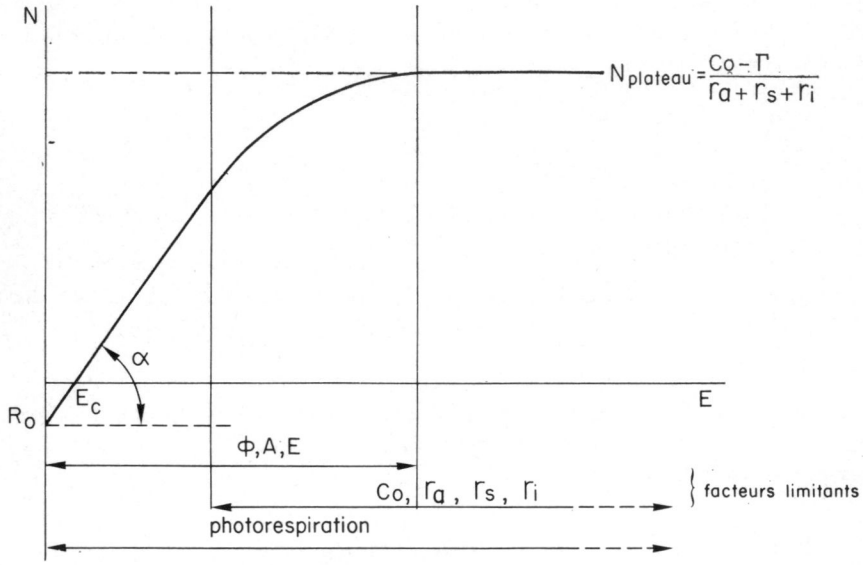


FIG. 2. — *Courbe N(E) théorique relative à une plante de type C_3.*
Theorical curve N(E) for a C_3 plant.

R_0 est la respiration à l'obscurité ; E_c le point de compensation pour la lumière ; α le rendement lumineux maximal ; φ le rendement quantique ; A le facteur d'absorption de la lumière par la feuille ; C_0 la concentration en CO_2 dans l'air ; Γ le point de compensation pour le CO_2 ; r_a la résistance à la diffusion du CO_2 dans l'air ; r_s la résistance stomatique pour le CO_2 ; r_i la résistance intracellulaire.

— le point de compensation pour le $CO_2(\Gamma)$, abcisse à l'origine ;

— la valeur de l'activité photosynthétique pour une teneur normale en CO_2 (300 Vpm) et en lumière non limitante : c'est le niveau du plateau de saturation (N_{max}) de la fonction N = f (Eclairement) pour cette valeur de C_0 à 300 Vpm (fig. 2). Cette valeur est accessible par le calcul si l'on connaît Γ et $\sum_r$.

TABLEAU 1

Plateau des courbes N = f(E) à 300 Vpm de CO_2
Max. values of N = f(E) at 300 Vpm of CO_2

	Fin de sécheresse Unité $mgCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$
Témoin 1	0,400 ± 0,125 *
Traité 1	0,825 ± 0,225 **
Témoin 2	0,600 ± 0,015
Traité 2	0,675 ± 0,022 ***
Témoin 3	0,445 ± 0,0075
Traité 3	0,575 ± 0,025 ***

* Ecart-type sur la moyenne.
** Significativement différent au seuil de 5 p. 100.
*** Significativement différent au seuil de 1 p. 100.

TABLEAU 2

Evolution de la conductance
Evolution of conductance

	Fin de sécheresse = t_0	t_0 + 4 jours de réhydratation
	Unité $mm\ s^{-1}$	
Témoin 1	0,8 ± 0,3 *	1,6 ± 0,3
Traité 1	1,8 ± 0,5 **	1,3 ± 0,2
Témoin 2	1,3 ± 0,03	1,4 ± 0,2
Traité 2	1,5 ± 0,05 ***	1,2 ± 0,1
Témoin 3	0,98 ± 0,02	0,9 ± 0,1
Traité 3	1,27 ± 0,05 ***	1 ± 0,1

* Ecart-type sur la moyenne.
** Significativement différent au seuil de 5 p. 100.
*** Significativement différent au seuil de 1 p. 100.

4.1. — *Plateau de saturation, conductance*

Les valeurs du plateau de saturation de la courbe N = f(E) sont données au tableau 1. Le plateau de photosynthèse des traités est supérieur à celui des témoins en début de réhydratation. Le tableau 2 représente les valeurs de la conductance en fin de sécheresse et après 4 jours de réhydratation. On peut remarquer que les traités obtiennent tous des valeurs de conductance supérieures à celles du témoin en début de réhydratation, mais que ce bénéfice s'efface en 3 ou 4 jours. De ces observations, on peut dire que la photosynthèse est plus intense chez le « traité » immédiatement après la sécheresse que chez le témoin.

Des mesures d'assimilation nette en atmosphère à 1,5 p. 100 d'oxygène (suppression de la photorespiration) ont montré un relèvement des valeurs de la conductance et du plateau de photosynthèse dans des proportions semblables sur plantes traité et témoin ; ce qui semble indiquer que la photorespiration n'est pas perturbée. La figure 3 montre l'effet oxygène sur un Lin bien alimenté en eau.

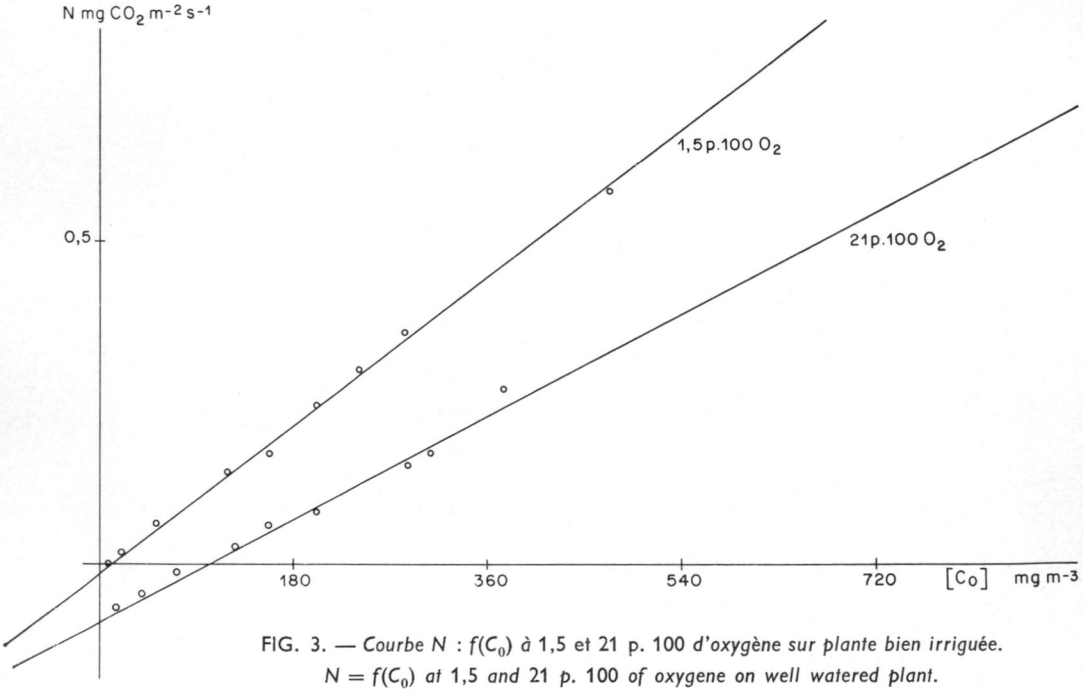


FIG. 3. — *Courbe N : $f(C_0)$ à 1,5 et 21 p. 100 d'oxygène sur plante bien irriguée.*
N = $f(C_0)$ at 1,5 and 21 p. 100 of oxygene on well watered plant.

Pente (mm. s^{-1})	1,5 p. 100 : 1,26 ± 0,02 *
	21 p. 100 : 0,95 ± 0,05
Σr (s. m^{-1})	1,5 p. 100 : 791 ± 13
	21 p. 100 : 1 045 ± 58

* Ecart type.

Les points de compensation pour le CO_2 n'ayant pas varié significativement dans les mesures à 21 p. 100 d'oxygène, on peut dire que les différences observées dans les

plateaux de photosynthèse à teneur normale en CO_2 sont essentiellement à relier à la variation de $1/\sum_r$.

4.2. — *Propriétés optiques des feuilles, observation au microscope*

Les mesures de propriétés optiques de feuilles, transmission et réflexion, effectuées en fin de sécheresse (15e jour), nous ont donné les résultats portés tableau 3. La variabilité est due essentiellement à la petitesse des échantillons. On observe des valeurs d'absorption déduites des mesures précédentes significativement différentes dans la gamme 0,5-0,6 μm. L'énergie supplémentaire absorbée se situe dans les longueurs d'onde verte-orange correspondant aux longueurs d'onde d'absorption des pigments de type caroténoïde (Costes, 1975) et qui ont un rôle dans la conduction de l'énergie due à l'excitation lumineuse.

TABLEAU 3

Propriétés optiques des feuilles
Optic properties of leaves

λ	0,5-0,6 μ	0,6-0,7 μ	0,7-0,8 μ	0,8-1,1 μ	
Transmission	32 $\pm$ 2 *	15 $\pm$ 2	64 $\pm$ 6	75 $\pm$ 6	
Réflexion.....	12 $\pm$ 1	5 $\pm$ 0,6	27 $\pm$ 1	31 $\pm$ 1	Témoin
Absorption	56 $\pm$ 3	80 $\pm$ 3	9 $\pm$ 7	< 1	
Transmission	25 $\pm$ 2 **	14 $\pm$ 1	60 $\pm$ 5	67 $\pm$ 4	
Réflexion.....	6,4 $\pm$ 0,6 **	3,8 $\pm$ 0,3	26 $\pm$ 1	29 $\pm$ 1	Traité
Absorption	68 $\pm$ 2 **	82 $\pm$ 1	14 $\pm$ 6	4 $\pm$ 5	

* Ecart-type sur la moyenne.
** Significativement différent au seuil de 1 p. 100.

Les figures 4 et 5 donnent l'aspect des cellules respectivement chez le témoin et chez le traité. On peut voir que les feuilles de Lin traité par la sécheresse présentent des chloroplastes dont la répartition dans le volume cellulaire est polaire alors que ceux du témoin ont une répartition uniforme. Après réhydratation, cette structure disparaît et revient à celle du témoin en 1 à 2 jours.

4.3. — *Rendement lumineux maximal de la photosynthèse*

En plaquant les feuilles de plusieurs tiges de Lin entre des fils de nylon, pour avoir une meilleure répartition de l'éclairement, nous avons pu obtenir une valeur du rendement lumineux maximal α représenté par la pente de la courbe $N = f(E)$ (fig. 2), de plantes bien alimentées en eau ; cette valeur est de 7,5 $\mu g\ J^{-1}$. La mesure n'a pas été

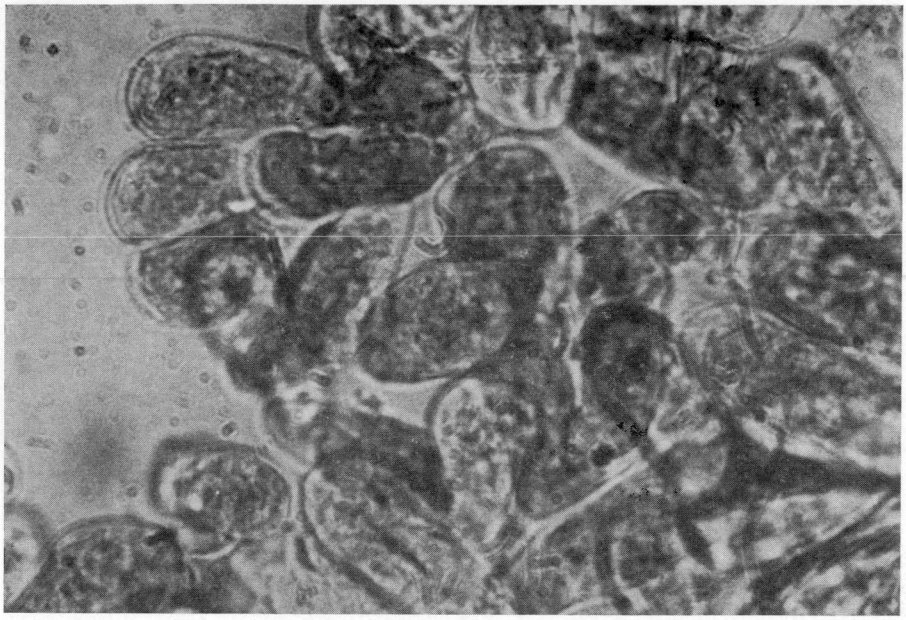


FIG. 4. — *Cellules chlorophyliennes de coupe transversale de feuille de Lin témoin* (× 800).
Leaf chlorophyl cells of control Flax (× 800).

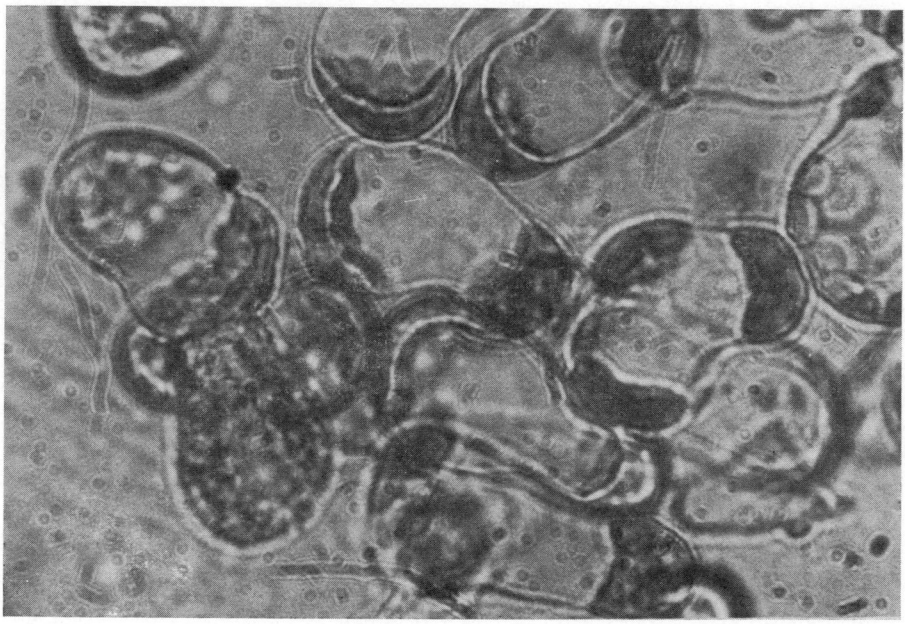


FIG. 5. — *Cellules chlorophyliennes de coupe transversale de feuille de Lin stressé* (× 800).
Leaf chlorophyl cells of dry Flax (× 800).

TABLEAU 4

Matière sèche en fin de sécheresse et après 11 jours de réhydratation
Dry matter at the end of watershortage and 11 days after rewatering

Exprimée en gramme par plante

	Fin de sécheresse = t_0	Matière sèche aérienne				Matière sèche racine				Matière sèche totale			
		Témoin	ΔMS	Traité	ΔMS	Témoin	ΔMS	Traité	ΔMS	Témoin	ΔMS	Traité	ΔMS
Série 1	t_0	0,355 5	0,116	0,320 8	0,093 2	0,104 3	0,041 7	0,112 8	0,038 2	0,459 9	0,157 7	0,433 6	0,131 4
	t_0 + 11 jours	0,471 6		0,414		0,146 0		0,151 0		0,617 6		0,565	
Série 2	t_0	0,276 4	0,207 1		0,101 8	0,135 1	0,012 8	0,153 5	0,009 8	0,411 5	0,219 9	0,353 2	0,111 6
	t_0 + 11 jours	0,483 5		0,199 7		0,147 9		0,163 3		0,631 4		0,464 8	
Série 3	t_0			0,301 5						0,427 7	0,548 4	0,416 4	0,228 9
	t_0 + 11 jours									1,021		0,645 3	

faite pour des plantes ayant subi la sécheresse ; cependant en nous appuyant sur la relation théorique

$$\alpha = \varphi A - \frac{Pr}{E} \text{ (Chartier et Bethenod, 1977 modifié)}$$

avec φ = rendement quantique,
A = facteur d'absorption de la lumière par la feuille,
Pr = photorespiration (valeur absolue),
E = éclairement,

nous pouvons penser que dans ces conditions et puisque Pr n'est pas modifié par le stress, l'augmentation du coefficient d'absorption de la lumière (A) doit se retrouver dans une augmentation du rendement lumineux maximal (α). Cela devrait se traduire par un relèvement de la pente à l'origine sur une courbe N = f(E) d'une plante stressée. Malheureusement cette mise en évidence expérimentale est illusoire tant que l'on travaille dans des valeurs de variation du même ordre que la précision des mesures.

4.4. — *Matière sèche élaborée en période de réhydratation*

Si l'on considère les valeurs de matière sèche en fin de sécheresse et après 11 jours de réhydratation (tabl. 4), on s'aperçoit que l'on n'obtient pas d'effet stimulant de post sécheresse. Le bilan total reste négatif.

Ce résultat n'est pas en accord avec ceux de Boyer (1975) qui constate une stimulation de croissance en matière sèche totale. Il semble toutefois que ses travaux ont utilisé un éclairement de croissance très faible de l'ordre de 80 Wm^{-2}. On a tenté (Rode, 1978) de trouver une explication à l'influence du niveau d'éclairement sur ces différences de comportement.

5. — Conclusion

Nous avons souligné l'action de la carence hydrique sur la répartition des chloroplastes et sur la conductance dans un sens favorable à la photosynthèse par unité de surface foliaire. Mais nous n'avons pas confirmé l'accélération de croissance induite par la sécheresse évoquée dans les travaux antérieurs. Il semble donc que lors de l'application d'une carence hydrique, on ne puisse considérer uniquement l'élément favorable, c'est-à-dire la stimulation de photosynthèse, pour tenter d'en faire un facteur d'augmentation des rendements. Néanmoins ce phénomène ne peut être négligé dans la modélisation d'une fonction de production rendement-facteur hydrique.

Reçu pour publication en février 1980.

Summary

Photosynthetic activity after a period of water shortage in Flax

A period of 15 days of water shortage is applied when Flax is 13 cm high. Net assimilation, optic properties of leaf and microscopic observations are made when rewatered.

Net assimilation of dry plants is 20 p. 100 higher, then it decreases after 2 days.

Absorption coefficient of leaves of dry plants is 10 p. 100 higher, then it decreases in the same time as net assimilation does, this variation occures beetween 0.5 and 0.6 μm.

Chloroplasts regularly placed in the cell of normal plants are only localised in the two poles of the dry plant cells.

No increase of growth has been noticed.

Zusammenfassung

Einfluss des wassermangels auf das photosynthetische verhalten des flachses

Wenn die Pflanze 13 cm hoch wird, werden während 14 Tage hydrische Defizite angewandt. Bei Wiederhydratation wurden die netto Assimilation und die optischen Eigenschaften der Blätter gemessen und Beobachtungen durch Lichtmikroskopie ausgeführt.

Der reine Assimilationsgrad liegt um 20 p. 100 höher bei Pflanzen, die der Dürre ausgesetzt waren, und nimmt dann während den zwei der Wiederhydratation folgende Tage ab um geringer als derjenige der Musterpflanzen zu werden.

Der Absorptionskoeffizient der Blätter um 10 p. 100 höher am Ende der Dürre bei Wassermangel ausgesetzten Pflanzen, fällt wieder auf den bei der Musterpflanze beobachteten Wert ab. Die Schwankung des Absorptionskoeffizienten ist vorallem empfindlich bei Wellenlängen zwischen 0,5 und 0,6 μm.

Die einheitlich im Zellvolumen der Musterpflanzen verteilten Chloroplasten zeigen am Ende der Dürre eine polare Lokalisierung in den Zellen der dem Wassermangel ausgesetzten Pflanzen.

Bei Wiederhydratation wurde keine Zunahme an Trockensubstanz beobachtet.

РЕЗЮМЕ

Влияние дефицита воды на процесс фотосинтеза у льна

Когда растения имеют 13 см в высоту, они подвергаются дефициту воды в течение 15 дней. Просматривают регидратацию в световом микроскопе, измеряют чистую ассимиляцию и оптические свойства листьев.

Чистая ассимиляция растений, претерпевших засуху, — выше на 20 р. 100, она уменьшается через два дня после регидратации и стоит ниже чистой ассимиляции контроля.

Коэффициент поглощения листьев — выше на 10 р. 100 у растений, претерпевших дефицит воды в конце засухи, он сравняется с коэффициентом контроля, но его колебания ощущаются прежде всего между 0,5 и 0,6 мкм.

У контроля, хлоропласты распределяются равномерно в клетке;но в клетках растений, лишённых водой в конце засухи, они находятся вблизи полюсов.

Во время регидратации не наблюдалось увеличения сухого вещества.

Références bibliographiques

BOYER Y., 1975. Premières études sur les mécanismes d'accélération de croissance induite par une sécheresse temporaire. *C. R. Acad. Sci. Paris*, série D, **280,** 283-286.

CHARTIER Ph., 1966*a*. Etude de la photosynthèse globale de la feuille. *C. R. Acad. Sci. Paris*, série D, **263,** 44-47.

CHARTIER Ph., 1966*b*. Etude théorique de l'assimilation brute de la feuille. *Ann. Physiol. vég.*, **8,** 167-196.

CHARTIER M., CHARTIER Ph., 1971. Design of an air conditioned assimilation chamber for detached leaves. Brief communication. *Photosynthetica*, **5,** 74-75.

CHARTIER Ph., BETHENOD O., 1977. La productivité primaire à l'échelle de la feuille. In : *Les processus de la production végétale primaire*, Gauthier-Villars Ed., 77-112.

COSTES C., 1975. Processus photochimiques et conversion énergétique de la lumière dans la feuille. In : *Photosynthèse et production végétale*, Gauthier-Villars Ed., 17-28.

REBELLA C., 1974. *Réflexion de l'énergie solaire par une culture de Maïs en fonction de sa biomasse. Application à la surveillance de zone de grande culture par télédétection.* Thèse de Docteur-Ingénieur, Univ. Paris VI, 99 p.

ROBELIN M., MINGEAU M., 1970. Alimentation en eau et croissance de la betterave. *Rev. Inst. Intern. Rech. Betterave*, **5** (2), 71-86.

RODE J. C., 1978. *Effet d'une sécheresse temporaire sur la croissance et les mécanismes des échanges gazeux chez le Lin.* Thèse 3e cycle, Univ. Paris VII, 59 p.

SINCLAIR R., THOMAS A. D., 1970. Optical properties of leaves of some species in arid South Australia. *Austr. J. Bot.*, **18,** 261-273.

Ann. agron., 1980, **31** (3), 297-317.

Teneurs en sélénium des plantes fourragères Influence de la fertilisation et des apports de sélénite

Éliane MORÉ et M. COPPENET

avec la collaboration technique de L. LE CORRE

Station d'Agronomie, I.N.R.A.,
Rue de Stang Vihan, 29000 Quimper

Résumé

Le dosage du sélénium a été effectué sur plusieurs centaines d'échantillons de plantes fourragères récoltées en Bretagne occidentale, essentiellement sur des ray-grass italiens et des maïs plante-entière. Les sols qui ont produit ces fourrages sont d'origine granitique ou schisteuse, c'est-à-dire des sols très désaturés dont le pH(H_2O) a été remonté, grâce aux amendements calcaires, jusqu'à des valeurs de 6,0-6,2.

Les teneurs observées sont pratiquement toutes comprises entre 0,020 et 0,100 p. p. m. de sélénium par rapport à la matière sèche, les moyennes étant de 0,030 pour les maïs plante entière, 0,035 pour les foins de ray-grass italien et 0,050 pour les ray-grass au stade pâture. Ces valeurs sont en accord avec un certain nombre de résultats obtenus par d'autres auteurs français ou étrangers.

Par des essais en plein champ ou en vases de végétation les auteurs ont étudié l'influence de divers fertilisants sur les teneurs en sélénium. Le relèvement du pH de 5,2 à 6,5 provoque un accroissement significatif de la richesse en sélénium du ray-grass italien au stade pâture. L'effet de la dose d'azote n'est pas significatif mais, par rapport au nitrate d'ammoniaque, le sulfate d'ammoniaque provoque une diminution de la teneur en sélénium du ray-grass italien alors que le nitrate de chaux provoque un accroissement de cette teneur. Le nitrate d'ammoniaque accroît les rendements sans diminuer la teneur en sélénium du ray-grass italien au stade pâture, le sulfate d'ammoniaque accroît les rendements mais a tendance à diminuer la teneur en sélénium. Trois engrais phosphatés différents appliqués en couverture ne font pas varier le taux de sélénium alors qu'ils élèvent nettement la teneur en phosphore du ray-grass au stade pâture.

Le sélénite de sodium incorporé intimement à toute la masse de terre des vases de végétation à raison de 1 p. p. m. de sélénium (soit environ 6,5 kg de sélénite/ha) enrichit encore le ray-grass italien à 0,100 p. p. m. Se/M. S., 5 ans après l'incorporation, sans risque de produire un fourrage toxique la première année.

Le sélénite de sodium en pulvérisation foliaire très diluée apportant 70 g Se/ha permet d'obtenir une teneur égale ou supérieure à 0,100 p. p. m. Se dans la matière sèche du ray-grass jusqu'à la quatrième exploitation sans risque de teneur toxique à la première récolte suivant la pulvérisation.

Ces derniers résultats sont intéressants pour le domaine des connaissances générales mais seront difficilement applicables à la pratique agricole étant donné la haute toxicité des sels de sélénium et leur prix actuel.

Introduction

Depuis 1962, la Station d'Agronomie (I.N.R.A.) de Quimper se penche sur la question des teneurs en oligoéléments des plantes fourragères. Comme suite aux études sur les carences en manganèse et en cuivre affectant diverses cultures, ces deux éléments ont d'abord été dosés au laboratoire, puis, étant donné l'intérêt du cobalt dans l'alimentation des ruminants, ce troisième oligoélément a été déterminé.

En liaison avec les organisations professionnelles (Maison de l'Elevage du Finistère en particulier) nous avons participé (entre 1964 et 1966) à une importante enquête sur les causes de l'infertilité bovine. Les analyses de fourrages effectuées à cette occasion ont permis d'aboutir à un certain nombre de conclusions pratiques telles que : nécessité de relever le taux de magnésium contenu dans les « compléments minéraux » habituellement commercialisés, intérêt de complémenter les rations des vaches laitières en cuivre et cobalt, surtout en régions granitiques.

Vers 1968, la Station d'agronomie a ajouté à la liste des éléments dosés le molybdène et le zinc, puis, enfin, vers 1973, le sélénium.

L'intérêt porté à ce dernier élément se justifie par le fait que nous devions connaître le plus complètement possible la composition minérale des fourrages récoltés en Bretagne, par le fait qu'en 1964 des carences en sélénium chez le veau de boucherie ont été signalées en France et, enfin, parce que nous voulions étudier les relations entre le sélénium apporté au sol et la teneur des végétaux correspondants. La matière sèche des plantes fourragères est en général trop pauvre en sélénium pour les besoins des bovins ($<$ 0,100 p. p. m./M. S.) mais la toxicité apparaît dès que cette teneur atteint 4 à 5 p. p. m.

Signalons, ici, à propos de l'intérêt du sélénium en biologie deux intéressantes mises au point récentes : celle de Johnson (1976) et celle de Duchaigne et Arvy (1978) en langue française.

En 1975, nous avons publié à l'Académie d'Agriculture de France les premiers résultats de nos travaux concernant les ray-grass et maïs récoltés dans le Finistère ainsi que l'action de l'incorporation de sélénite au sol (essais en pots) (Moré, Coppenet et Le Corre, 1975).

Dans le présent mémoire, nous publions le complément de nos travaux sur ces précédents points ainsi que l'influence des engrais azotés et du chaulage sur les teneurs en sélénium des végétaux, puis les effets de pulvérisations foliaires de solutions très diluées de sélénite de sodium.

Techniques expérimentales et matériel utilisé

En vue de connaître la teneur en sélénium des fourrages récoltés en Bretagne, les échantillons correspondant à la fraction consommée par les bovins, ont été prélevés par nous-mêmes ou par les techniciens des Chambres d'Agriculture. Pour les graminées fourragères, il s'agit essentiellement de ray-grass italien coupé à 5 cm de hauteur, le stade pâturage étant caractérisé par l'ébauche d'épi à environ 10 cm de hauteur. D'autres échantillons ont été fauchés, soit au stade épiaison, soit au moment où la graminée est transformée en foin. Les échantillons, représentant environ 1 kg de matière verte, sont constitués de plusieurs poignées d'herbe prises au hasard sur l'étendue d'une parcelle de culture si celle-ci n'est pas trop vaste ou seulement sur l'étendue d'une ration journalière délimitée par le fil électrique de clôture.

Les ensilages de maïs plante-entière ont été prélevés directement sur le front du silo au cours de sa période de consommation alors que vingt échantillons correspondent à des « bouchons » de maïs déshydraté prélevés à la sortie de l'usine.

Les expérimentations sur l'influence du chaulage et de la fertilisation azotée ont

été conduites en plein champ par le dispositif des blocs ou des carrés latins avec quatre répétitions. Les pulvérisations foliaires de sélénite de sodium ont été également réalisées en plein champ sur des microparcelles de 4 m².

Des cultures en vases de végétation ont enfin été effectuées pour ce qui concerne l'incorporation de sélénite dans le sol : pots contenant 13 kg de terre à l'état humide.

Les échantillons végétaux, recueillis proprement, sont transportés rapidement au laboratoire pour y subir la dessiccation. Certains auteurs ayant proposé une dessiccation à 40° ou 50 °C au lieu de 80 °C comme cela est pratiqué couramment par les laboratoires d'analyses végétales, nous avons étudié ce point pour des poudres de maïs et de ray-grass. Aucune différence significative entre 50° et 80° n'est apparue dans les résultats, aussi adoptons-nous une température de 80°. Cette observation nous permet le dosage du sélénium sur des poudres végétales provenant d'essais antérieurs effectués sur d'autres thèmes et présentant également de l'intérêt en ce qui concerne cet oligoélément.

La méthode analytique utilisée pour le *dosage après minéralisation nitroperchlorique* est celle de Lamand (1969) dérivée de celle de Watkinson (1966). Son principe repose sur la mesure de la fluorescence émise par le piazsélénole formé avec le 2-3 diaminonaphtalène.

Le coefficient de variation (C.V.) de cette méthode, déterminé à partir de dix analyses de la même poudre de ray-grass réparties dans deux séries de dosages différentes, est de 11,5 p. 100. Ce C.V. nous semble normal pour une détermination de ce genre et est à rapprocher des C.V. calculés pour divers dosages d'oligoéléments dans des poudres de maïs : Mo = 14 p. 100, Cu = 11 p. 100, Co = 10 p. 100, Mn = 8,5 p. 100 (Coppenet, 1972). Les éléments majeurs sont dosés avec des C.V. nettement plus faibles pour les mêmes poudres de maïs : P = 2,7 p. 100, K = 3,3 p. 100, Ca = 6 p. 100.

Résultats et discussions

I. — *Teneurs en sélénium de plantes fourragères récoltées en Bretagne*

Le tableau 1 donne une vue d'ensemble des teneurs de plantes fourragères récoltées au cours des dernières années ; il concerne surtout les ray-grass d'Italie au stade pâture et les maïs. La presque totalité des résultats analytiques est comprise entre 0,020 et 0,100 p. p. m. Se par rapport à la matière sèche et cet intervalle correspond à celui qui est généralement signalé par la plupart des auteurs pour des plantes fourragères diverses. Les diverses espèces végétales présentent d'ailleurs peu de différences de teneurs lorsqu'il s'agit d'espèces non accumulatrices poussant sur des sols non sélénifères (Duchaigne et Arvy, 1978). Dans le Limousin, Arvy, Lamand et Bonnemain (1974) ne trouvent pas de différence entre graminées et légumineuses mais notent que la fétuque des prés est moins riche que le dactyle.

Ehlig, Allaway et Cary (1968) signalent que les différences spécifiques entre cinq espèces sont faibles : luzerne, trèfle rouge, dactyle, brome, fléole. Il en est de même pour six espèces récoltées dans l'Ontario : lotier, dactyle, brome, fléole, alpiste et fétuque rouge (Lessard et Hidiroglou, 1968).

TABLEAU 1

Teneurs en sélénium de plantes fourragères récoltées en Bretagne
Selenium content of forage plants grown in Brittany

	Nombre	Moyenne p. p. m. M. S.	Extrêmes p. p. m. M. S.
Ray-grass italien, stade pâture très jeune (1)			
(automne 1974)	24	0,066	0,038 et 0,134
Ray-grass italien, stade pâture très jeune (2)			
(printemps 1975) 1er pâturage	30	0,047	0,024 et 0,080
2e pâturage	18	0,059	0,030 et 0,122
(printemps 1976) 1er pâturage	49	0,040	0,024 et 0,092
2e pâturage	16	0,046	0,023 et 0,080
(printemps 1977) 1er pâturage	50	0,057	0,025 et 0,131
2e pâturage	37	0,068	0,035 et 0,128
(printemps 1978) 1er pâturage	57	0,045	0,020 et 0,085
2e pâturage	39	0,050	0,023 et 0,097
Ray-grass italien, stade pâture normal			
Finistère	22	0,043	0,020 et 0,066
Morbihan	32	0,044	0,024 et 0,069
Ray-grass italien, stade épiaison	48	0,035	0,019 et 0,066
Ray-grass anglais, stade pâture très jeune	18	0,079	0,040 et 0,133
Fétuque élevée, stade pâture (Morbihan)	64	0,048	0,028 et 0,117
Maïs plante entière, au stade ensilage			
récolte 1970	33	0,029	0,018 et 0,040
récolte 1971	35	0,030	0,019 et 0,058
récolte 1977	27	0,038	0,026 et 0,066
Maïs plante entière, au stade ensilage déshydraté (1970-1971)	20	0,037	0,024 et 0,054
Maïs grain récolte 1974	15	0,024	0,018 et 0,028
Choux fourragers, à pâturer	18	0,026	0,021 et 0,035
Choux fourragers (tiges + feuilles)	5	0,046	0,032 et 0,051
Betteraves fourragères (racines)	6	0,039	0,025 et 0,062

(1) Ces ray-grass récoltés à l'automne 1974 suivent de 3 à 5 semaines le pâturage précédent.
(2) Ces ray-grass récoltés au printemps suivent de 2 mois 1/2 environ le semis. Ils constituent donc la première exploitation et proviennent, comme ci-dessus (1), d'élevages utilisant de fortes doses d'engrais azotés ou de lisiers.

Ray-grass italien au stade épiaison.

Ce stade correspond sensiblement à celui auquel la graminée est fauchée avant sa transformation en foin : stade épiaison-floraison. Pour quarante-huit échantillons provenant de quarante-huit parcelles de ray-grass en culture pure, la moyenne des teneurs est : 0,035 p. p. m. Se/M. S. Lamand (1970) avait trouvé 0,030 p. p. m. de moyenne pour cent vingt dosages dans les fourrages provenant de diverses régions françaises où la myopathie sévit avec une morbidité plus ou moins élevée. Bellanger, Périgaud et Lamand (1973) trouvent une moyenne de 0,040 p. p. m. pour cent échantillons de foins de 1re coupe en provenance de trente-six départements français, ces foins n'étant pas obligatoirement à base de ray-grass italien. On constate donc que les foins de graminées de diverses régions françaises ont des teneurs en sélénium très voisines les unes des autres.

Ray-grass italien au stade pâturage.

Au cours de quatre années successives, de 1975 à 1978, nous avons analysé les premiers et seconds pâturages de l'année pour des semis du printemps correspondant. Les parcelles, au nombre d'une cinquantaine si possible, ont été choisies chez des éleveurs où l'intensification fourragère est poussée ; elles sont réparties sur toute l'étendue du département du Finistère. La fertilisation azotée comporte, en général, 60 kg N/ha du nitrate d'ammoniaque au moment du semis et 60 kg après le premier pâturage. Il y a souvent, en plus, un enfouissement, avant les semis, de 50 m^3/ha de lisier à 4 ou 5 p. 1 000 d'azote total. Le sol de ces parcelles cultivées a un pH assez voisin de 6,0 (valeur normale pour la région) ; il est très riche en P_2O_5 assimilable, riche en K et Mg échangeables. Les ray-grass, pâturés à un stade physiologique très jeune, sont très riches en matières azotées totales (N p. 100 $\times$ 6,25), puisque les teneurs sont comprises entre 15 et 30 p. 100, mais il n'y a pas de corrélation entre cette teneur et la teneur en sélénium qui est, ici, plus élevée qu'au stade épiaison : 0,045 à 0,060 p. p. m. selon les années.

L'année 1976, exceptionnellement sèche, a produit des herbes pauvres en Se et P alors que les teneurs en Ca et Mg étaient supérieures à la normale. Pour l'ensemble des pâturages des quatre années étudiées, le nombre des échantillons, dont la teneur dépasse 0,100 p. p. m. Se/M. S. (recommandation zootechnique), atteint 8 p. 100 ce qui est une proportion relativement importante. Les graminées fourragères jeunes sont plus riches en sélénium qu'au stade épiaison-floraison, ce qui correspond aux observations faites pour la plupart des minéraux principaux (P, Ca, Mg, Na, K, S) et oligoéléments (Cu, Zn, Co). Une autre remarque intéressante réside dans le fait que le second pâturage (juillet) est toujours plus riche en sélénium que le premier pâturage (juin). Ce phénomène d'accroissement des teneurs au fur et à mesure des pâturages successifs avait déjà été mis en évidence par l'un d'entre-nous pour les oligoéléments tels que Cu, Mn, Zn ainsi que pour Ca, Mg, Na (Coppenet, 1964). Ce fait est également bien confirmé par la forte teneur moyenne des ray-grass de l'automne 1974 comme cela apparaît à la 1re ligne du tableau 1.

Lessard et Hidiroglou (1968) ont trouvé également des deuxièmes coupes plus riches en sélénium que les premières en ce qui concerne l'alpiste et la fléole.

Les teneurs extrêmes observées entre les différentes parcelles et pour chaque époque de pâturage des ray-grass italiens sont dans le rapport de 1 à 4. Cet écart peut paraître important mais il y a lieu d'observer qu'il est également de 1 à 4 pour les oligoéléments comme Cu, Co, Zn alors qu'il n'est que de 1 à 2 pour P, Ca, Mg, K.

Maïs-fourrage.

Les plantes entières de maïs ensilées, dont 50 p. 100 environ de la matière sèche totale provient du grain, ont des teneurs en sélénium inférieures à celles des ray-grass jeunes et sensiblement égales à celles des foins : 0,030 p. p. m.

Les grains de maïs sont moins bien pourvus en sélénium que le reste de la plante et cette constatation rejoint celle de Arvy, Lamand et Bonnemain (1974) faite dans le Limousin.

Les teneurs extrêmes relevées entre parcelles différentes sont moins éloignées que dans le cas des ray-grass, de 1 à 2,5 seulement. Le maïs au moment de l'ensilage

est une plante adulte, le grain est pratiquement mûr et il y a moins de différences entre les diverses parcelles que dans le cas des ray-grass au stade pâture qui évoluent très vite en quelques jours.

Les quelques analyses de choux fourragers dont les résultats sont indiqués en bas du tableau 1 ne laissent pas entendre que les plantes de la famille des crucifères (riches en soufre) soient également plus riches en sélénium que celles d'autres familles botaniques.

II. — *Influence du chaulage des sols sur la teneur en sélénium des fourrages*

L'action des amendements calcaires sur la teneur en sélénium a été étudiée :

— d'une part en vases de végétation, d'autre part en plein champ, pour le ray-grass d'Italie,

— au cours de deux expérimentations réalisées en plein champ pour le maïs.

1. *Ray-grass italien. Essai en vases de végétation.*

Les pots contiennent 10 kg de terre sèche provenant d'une parcelle de pH 5,15 et se répartissent ainsi : quatre pots témoins, quatre pots ayant reçu chacun 10 g de CaO (sous forme de maërl broyé) et quatre pots ayant reçu chacun 20 g de CaO. Ces doses correspondent respectivement à 3 t et à 6 t de CaO par hectare environ. Elles ont été incorporées et mélangées à toute la masse de terre des pots le 10 mars 1971.

La fumure phosphopotassique a été apportée sous forme de phosphate bipotassique (2 g par pot). Le ray-grass (variété Tétrone) a été semé le 9 avril. Le tableau 2 indique les teneurs en sélénium de la matière sèche de trois coupes effectuées au stade pâture.

TABLEAU 2

Influence du chaulage sur la teneur en sélénium du ray-grass (en p. p. m. de Se/M. S.)
Effect of liming on the selenium content of rye-grass (p. p. m. Se in dry matter)

	Pots témoins (pH = 5,15)	Pots chaulés dose 1 (pH = 5,95)	Pots chaulés dose 2 (pH = 6,85)
Coupe du 29/6/1971	0,064	0,067	0,072 *
Coupe du 28/7/1971	0,055	0,048	0,073 **
Coupe du 8/5/1972	0,047	0,048	0.055 *

* Significatif au seuil de probabilité P = 0,05.
** Significatif au seuil de probabilité P = 0,01.

Nous constatons une augmentation de la teneur en sélénium sous l'influence du chaulage. Cet accroissement est significatif pour les trois coupes, mais seulement pour la dose 2 ayant porté le pH du sol de 5,15 à 6,85.

2. *Ray-grass italien. Champ de Lennon* (1976-1977).

Ce champ d'expérience sur sol schisteux, riche en matière organique, est l'un des quatre champs mis en place pour l'étude de nouveaux calcaires marins dans le

cadre d'une convention passée avec le C.N.E.X.O. Le dispositif comporte vingt-quatre parcelles et deux répétitions, la parcelle élémentaire ayant une superficie de 64 m². Les calcaires ont été épandus le 26/4/1976 à deux doses : dose 1) 2 t/ha de CaO,

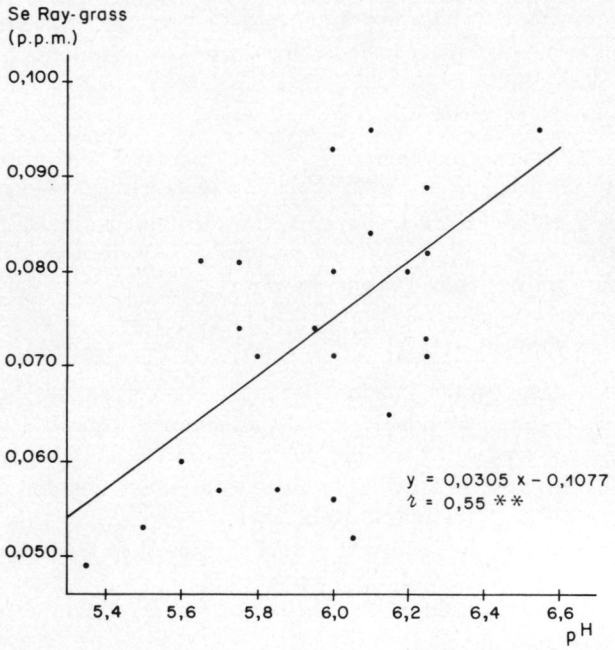


FIG. 1. — *Corrélation entre la teneur en sélénium du ray-grass et le pH du sol* (1re coupe).
Correlation between the selenium content of rye-grass and the soil pH (first cut).

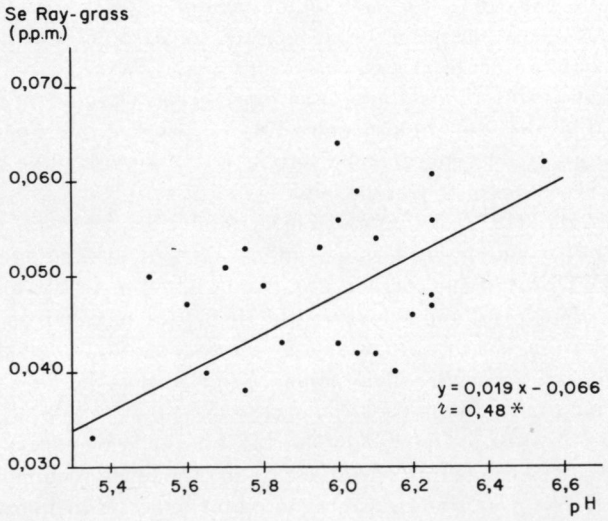


FIG. 2. — *Corrélation entre la teneur en sélénium du ray-grass et le pH du sol* (2e coupe).
Correlation between the selenium content of rye-grass and the soil pH (second cut).

dose 2) 4 t/ha de CaO. Le ray-grass italien, variété Tiara, a été semé le 8/10/1976. Deux coupes ont été effectuées au stade pâture.

Il existe une corrélation positive entre la teneur en sélénium du ray-grass et le pH du sol de la parcelle correspondante (fig. 1 et 2). Cette corrélation est significative au seuil de probabilité $P = 0,01$ pour la première coupe avec un coefficient $r = 0,55$ et au seuil de probabilité $P = 0,05$ pour la deuxième coupe avec $r = 0,48$.

3. *Maïs. Champ de Lennon* (1976).

Même champ que précédemment et même dispositif expérimental. Le maïs, variété DEKALB 202, semé le 15/5/1976 a été récolté le 21 septembre. Aucune corrélation n'a pu être établie entre les teneurs en sélénium du maïs, comprises entre 0,025 et 0,050 p. p. m., et le pH des différentes parcelles variant de 5,35 à 6,55 suivant les doses et les formes des calcaires enfouis.

4. *Maïs. Champ de Plomelin* (1977).

Essai mis en place également dans le cadre de l'étude des nouveaux sables calcaires marins. Terrain granitique, très riche en matière organique, divisé en trente-six parcelles élémentaires de 64 m². Les calcaires ont été épandus le 10 mars 1976, à deux doses : 3 t CaO/ha et 6 t CaO/ha avec trois répétitions. Le maïs, INRA 260, semé le 19 avril 1977 a été récolté le 10 octobre.

Le pH des différentes parcelles varie de 4,95 à 6,25, et les teneurs en sélénium du maïs (feuilles + tiges) de 0,018 à 0,052 p. p. m.

Comme dans l'essai précédent, il n'existe pas de corrélation entre le pH du sol et la teneur en sélénium du maïs.

Dans la bibliographie, nous avons relevé trois publications se rapportant à l'influence du pH sur la teneur en sélénium de la plante.

Cary et Allaway (1969), au cours d'essais en pots réalisés avec quatre sols différents, chaque sol à deux pH (l'un acide ou faiblement acide, l'autre légèrement alcalin), signalent que l'enrichissement de la luzerne, après apport de sélénium au sol, est le plus important au pH le plus élevé.

Gissel-Nielsen (1971), d'après une expérience en pots contenant des sols enrichis en sélénium dont les pH sont compris entre 5,4 et 8, indique que l'enrichissement en sélénium du ray-grass est généralement le plus faible au voisinage de la neutralité. Il augmente en sols acides et en sols alcalins.

Gupta et Winter (1975) constatent que la teneur en sélénium de fourrages et céréales récoltés en plein champ n'est pas influencée par le chaulage.

Nous pouvons retenir que lorsque l'on chaule les sols de Bretagne Occidentale pour faire passer leur pH d'une valeur voisine de 5,2 (beaucoup trop basse pour une culture normale) à une valeur voisine de 6,5, le ray-grass italien au stade pâture voit sa teneur en sélénium s'accroître d'une manière significative. Le maïs récolté au stade ensilage sur les mêmes sols n'accuse pas d'accroissement de teneur en sélénium mesurable. L'explication réside probablement dans le fait que le ray-grass au stade pâture est une plante jeune, sensible aux variations de la composition chimique du sol alors que le maïs est récolté à un stade voisin de la maturité de ses graines. Ce même phénomène a été constaté pour d'autres éléments.

L'accroissement des teneurs en sélénium avec l'élévation du pH des sols est le

phénomène inverse de celui observé avec les éléments métalliques (Co, Zn, Mn) contenus dans la matière sèche des ray-grass (Coppenet *et al.*, 1972 ; Coppenet et Moré, 1973 ; Coppenet, 1973).

Le pH du sol a une influence sur la nature des composés séléniés et la concentration en sélénium de la solution du sol. Entre les pH 4 et 8, l'augmentation d'une unité pH double la concentration en Se^{4+} de la solution du sol et au-delà de pH 8, les complexes d'adsorption sélénite ferrique-hydroxyde ferrique sont décomposés (Geering *et al.*, 1968).

III. — *Influence des engrais azotés sur la teneur en sélénium des ray-grass et maïs*

Divers essais conduits en plein champ ont permis d'étudier l'action des engrais azotés sur la teneur en sélénium du ray-grass italien et du maïs. Les trois premiers essais concernent le ray-grass, les deux autres se rapportent au maïs.

1er *essai. Quimper* 1973 (*ray-grass*).

Terrain de la Station d'Agronomie, bien pourvu en éléments fertilisants. Le dispositif comporte quatre répétitions avec le système du carré latin, les parcelles élémentaires ayant une superficie de 4 m². Le ray-grass italien (variété Tétrone) a été semé le 9/4/1973. Les engrais azotés ont été apportés sous deux formes : nitrate d'ammoniaque et nitrate de chaux et, pour chaque forme, à quatre doses : 30, 60, 90 et 120 kg N/ha. Le champ d'expérience recevant peu de fumures organiques depuis plusieurs années, on a considéré la dose 30 N comme le témoin sans azote. Les exploitations ont comporté trois coupes au stade pâture.

Le tableau 3 donne pour chaque traitement et chaque coupe la moyenne des

TABLEAU 3

Quimper 1973. *Influence des engrais azotés sur la teneur en sélénium du ray-grass* (p. p. m. de Se/M. S.)
Quimper 1973. *Effect of nitrogen fertilizers on the selenium content of rye-grass* (p. p. m. Se in dry matter)

	30 N	60 N	90 N	120 N
Nitrate d'ammoniaque				
1re coupe 19/6/1973	0,042	0,046	0,045	0,038
2e coupe 25/7/1973	0,091	0,095	0,147	0,110
3e coupe 30/8/1973	0,078	0,069	0,106	0,093
Moyenne	0,070	0,070	0,099	0,080
Rendements (indice)	1	1,37	1,43	1,44
Nitrate de chaux				
1re coupe 19/6/1973	0,059	0,050	0,055	0,052
2e coupe 25/7/1973	0,173	0,162	0,194	0,105
3e coupe 30/8/1973	0,146	0,089	0,083	0,114
Moyenne	0,126	0,100	0,110	0,090
Rendements (indice)	1	1,37	1,43	1,44
Analyse statistique	dl	F		
Effet forme	1	6,8 *	Significatif à P = 5 p. 100	
Effet dose	3	1,0	Non significatif	

teneurs en sélénium des quatre répétitions, la moyenne non pondérée de l'année et l'indice du rendement obtenu.

Nous constatons un léger enrichissement en sélénium du ray-grass italien avec le nitrate d'ammoniaque aux deuxième et troisième coupes, par contre, le nitrate de chaux provoque une diminution des teneurs dans les trois coupes, mais, dans l'un comme dans l'autre cas, ces différences ne sont pas significatives, alors que la forte dose d'azote fait passer l'indice du rendement à 1,44.

Pour une même dose d'azote, les teneurs sont toujours plus élevées avec le nitrate de chaux qu'avec le nitrate d'ammoniaque et le calcul statistique révèle que l'effet forme d'azote est significatif au seuil de probabilité P = 0,05.

La quantité de sélénium contenue dans les trois récoltes des parcelles de l'essai avec nitrate d'ammoniaque est de 0,40 g/ha pour les témoins et de 0,66 g/ha pour les parcelles 120 N, soit des chiffres du même ordre de grandeur que ceux obtenus pour le cobalt et pour la même plante (Coppenet *et al.*, 1972).

2e *essai. Quimper* 1976-1977 (*ray-grass*).

Cette expérience a été réalisée dans le même champ que précédemment et selon le même dispositif en carré latin. Le semis du ray-grass italien (variété Tiara) a eu lieu le 1/9/1976, l'apport d'azote le 8/10/1976, sous deux formes : nitrate d'ammoniaque et sulfate d'ammoniaque et aux mêmes doses que dans le premier essai : 30, 60, 90 et 120 kg N/ha. Quatre coupes ont été effectuées au stade pâture, la première à l'automne 1976, les trois autres au printemps 1977, la cinquième exploitation étant faite au stade foin.

Les teneurs en sélénium sont données dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Quimper 1976-1977. *Influence des engrais azotés sur la teneur en sélénium du ray-grass* (p. p. m. de Se/M. S.)
Quimper 1976-1977. *Effect of nitrogen fertilizers on the selenium content of rye-grass* (p. p. m. Se in dry matter)

	30 N	60 N	90 N	120 N
Nitrate d'ammoniaque				
1re coupe 5/11/1976	0,074	0,065	0,057	0,085
2e coupe 8/3/1977	0,099	0,087	0,084	0,069
3e coupe 21/4/1977	0,060	0,062	0,050	0,062
4e coupe 23/5/1977	0,108	0,122	0,120	0,104
5e coupe 7/7/1977	0,088	0,101	0,082	0,104
Moyenne	0,086	0,087	0,078	0,085
Rendements (indice).....	1	1,28	1,38	1,41
Sulfate d'ammoniaque				
1re coupe 5/11/1976	0,064	0,077	0,055	0,067
2e coupe 8/3/1976	0,091	0,057	0,067	0,048
3e coupe 21/4/1977	0,065	0,052	0,044	0,051
4e coupe 23/5/1977	0,081	0,063	0,060	0,060
5e coupe 7/7/1977	0,064	0,059	0,078	0,075
Moyenne	0,073	0,061	0,061	0,060
Rendements (indice).....	1	1,40	1,56	1,60
Analyse statistique	dl	F		
Effet forme	1	24,5 **	Significatif à P = 1 p. 100	
Effet dose	3	1,0	Non significatif	

Les variations des teneurs en sélénium en fonction de la dose d'azote ne sont pas nettes ; ces teneurs sont en légère augmentation ou en diminution ou encore pratiquement constantes selon les coupes, alors que les accroissements de rendements sont de 1 à 1,41 et 1 à 1,60. Le calcul statistique fait apparaître que l'effet dose d'azote n'est pas significatif alors que l'effet forme d'azote est significatif au seuil de probabilité $P = 0,01$. Les teneurs obtenues avec le sulfate d'ammoniaque sont toujours inférieures à celles observées lorsque l'engrais azoté est apporté sous forme de nitrate d'ammoniaque.

Nous savons que le sulfate d'ammoniaque acidifie le sol plus fortement que le nitrate d'ammoniaque, ce qui nous donne une explication puisque l'acidification localisée et momentanée aurait un effet inverse de celui du chaulage vu au chapitre précédent. L'antagonisme soufre-sélénium (Hurd-Karrer, 1938) pourrait également avoir une action dans le même sens. Le total des cinq coupes contient 1,08 g/ha de sélénium avec la forte dose de nitrate d'ammoniaque alors qu'il n'en contient que 0,83 g/ha avec la forte dose de sulfate d'ammoniaque.

3e *essai. Fouesnant* 1976 (*ray-grass*).

Domaine du lycée agricole de Bréhoulou, Fouesnant (Finistère). Essai effectué avec le système des blocs, surface des parcelles élémentaires 20 m², quatre répétitions, dans le but d'étudier l'influence de la fertilisation azotée intensive sur la composition du ray-grass d'Italie. Le ray-grass, variété Tiara, semé en mai 1975, a été pâturé pendant 8 jours au cours de cette première année. L'engrais azoté a été apporté le 26/2/1976, sous deux formes : nitrate d'ammoniaque et sulfate d'ammoniaque, aux doses suivantes : 0, 40, 80, 120 kg N/ha. Deux coupes ont été faites les 6 avril et 12 mai 1976. Le tableau 5 donne les teneurs en sélénium des herbes récoltées (moyenne des quatre parcelles de chaque traitement et moyenne des deux coupes).

TABLEAU 5

Fouesnant 1976. *Influence des engrais azotés sur la teneur en sélénium du ray-grass* (p. p. m. de Se/M. S.)
Fouesnant 1976. *Effect of nitrogen fertilizers on the selenium content of rye-grass* (p. p. m. Se in dry matter)

	0 N	40 N	80 N	120 N
Nitrate d'ammoniaque				
1re coupe 6/4/1976	0,035	0,036	0,031	0,033
2e coupe 12/5/1976	0,053	0,046	0,048	0,043
Moyenne	0,044	0,041	0,039	0,038
Rendements (indice)	1	2,06	2,36	2,49
Sulfate d'ammoniaque				
1re coupe 6/4/1976	0,030	0,027	0,021	0,025
2e coupe 12/5/1976	0,039	0,037	0,030	0,032
Moyenne	0,034	0,032	0,025	0,028
Rendements (indice)	1	2,17	2,79	2 94
Analyse statistique	dl	F		
Effet forme	1	17,3 **	Significatif à P = 1 p. 100	
Effet dose	3	0,7	Non significatif	

Nous observons, aux deux coupes, et quelle que soit la nature de l'engrais azoté, une chute des teneurs en fonction de la dose apportée, mais cette diminution n'est pas significative alors que les rendements passent de 1 à 2,49 et de 1 à 2,94.

L'effet forme d'azote est, ici encore, hautement significatif, le sulfate d'ammoniaque provoquant un abaissement des teneurs par rapport au nitrate d'ammoniaque, ce qui confirme tout à fait les résultats de l'essai précédent.

4e *essai. Quimper* 1973 (*Maïs*). *Essai A.*

Champ d'expérience de la Station d'Agronomie. Semis du maïs, variété INRA 200, le 18 avril 1973. Il y a quatre traitements : 0, 150, 200, 300 kg/ha d'azote, sous forme de nitrate d'ammoniaque. La moitié de l'engrais azoté a été apportée au semis, le reste, le 27 juin, quelques jours avant le début de la floraison mâle. Le maïs a été récolté le 27 septembre.

Le tableau 6 donne, pour chaque traitement, les teneurs des plantes entières correspondant à la moyenne de deux parcelles. On voit que la fertilisation azotée accroît la production du maïs mais diminue sensiblement sa teneur en sélénium.

TABLEAU 6

Quimper 1973. *Influence des engrais azotés sur la teneur en sélénium du maïs* (p. p. m. de Se/M. S.)
Quimper 1973. *Effect of nitrogen fertilizers on the selenium content of maize* (p. p. m. Se in dry matter)

Nitrate d'ammoniaque	0 N	150 N	200 N	300 N
Essai A				
Moyenne de 2 répétitions	0,047	0,034	0,031	0,030
Rendements (indice)	1	1,50	1,79	1,76
Essai B				
Moyenne de 2 répétitions	0,050	0,037	0,037	
Rendements (indice)	1	1,63	1,53	

5e *essai. Quimper* 1973 (*maïs*). *Essai B.*

Même champ d'expérience et essai analogue au précédent mais comportant seulement trois traitements : 0, 150, 200 kg/ha d'azote, sous forme de nitrate d'ammoniaque, la moitié apportée au semis du maïs, le 2 mai 1973, le reste le 27 juin. La récolte a eu lieu le 24 septembre.

Le tableau 6 indique les teneurs correspondant aussi à la moyenne des deux répétitions. Les résultats sont semblables à ceux de l'essai précédent : chute des teneurs de 0,050 à 0,037 p. p. m. avec les doses 150 et 200 kg d'azote par hectare.

En résumé, nous pouvons conclure à propos de l'effet des engrais azotés :

— l'intensification azotée à base de nitrate d'ammoniaque accroît fortement la production du ray-grass italien en culture pure sans conséquence importante sur la teneur en sélénium au stade du pâturage ;

— l'intensification à base de sulfate d'ammoniaque accroît également les rendements mais avec une tendance à la diminution des teneurs en sélénium ;

— l'intensification azotée du maïs, à base de nitrate d'ammoniaque, accroît fortement la production du maïs plante entière (stade ensilage) mais en diminuant nettement la teneur en sélénium.

IV. — *Influence des engrais phosphatés sur la teneur en sélénium du ray-grass*

Essai réalisé au champ d'expérience de la Station d'Agronomie : épandage d'engrais phosphatés, en couverture, sur sol « riche » en P_2O_5 citrique (0,330 p. 1 000). Divers engrais phosphatés (scories Thomas, superphosphate ordinaire, phosphate d'ammoniaque) ont été apportés sur du ray-grass d'Italie (variété Tétrone), à raison de 80 kg/ha de P_2O_5, au semis, le 31 mars 1971. Les engrais phosphatés n'ont pas eu d'action sur les rendements comme cela était prévisible.

Le tableau 7 donne les teneurs en sélénium des herbes récoltées au stade pâturage pour deux exploitations.

TABLEAU 7

Influence des engrais phosphatés sur la teneur en sélénium du ray-grass (en p. p. m. de Se/M. S.)
Effect of phosphorus fertilizers on the selenium content of rye-grass (p. p. m. Se in dry matter)

	Témoin	Scories Thomas	Superphosphate	Phosphate d'ammoniaque
Coupe du 22/7/1971	0,055	0,058	0,054	0,058
Coupe du 31/8/1971	0,070	0,071	0,060	0,070

Les trois engrais phosphatés ne font pas varier, ou très peu, la teneur en sélénium des ray-grass alors qu'ils accroissent très nettement leur teneur en phosphore : + 19 p. 100 avec le superphosphate, + 20 p. 100 avec le phosphate d'ammoniaque dans la coupe du 22 juillet, + 11 p. 100 et + 17 p. 100 respectivement avec ces mêmes engrais dans la coupe du 31 août.

Carter, Robbins et Brown (1972), expérimentant sur quatorze sols différents, signalent que l'apport de phosphore dans le sol augmente de façon significative la teneur en sélénium de la luzerne dans six cas. D'après ces auteurs, le sélénium que peuvent renfermer les engrais phosphatés ne semblerait pas intervenir de façon importante dans les augmentations de teneurs en sélénium.

V. — *Enrichissement en sélénium du ray-grass et du maïs sur pied*

Le sélénium, apporté sous forme de sélénite de sodium a été appliqué de deux façons :

— en pots, mélangé intimement à toute la masse de terre,

— en pulvérisations foliaires et à des doses beaucoup plus faibles (Moré, Coppenet, Le Corre, 1975).

1. *Essais en pots.*

Notre premier essai a été réalisé en vases de végétation contenant 10 kg de terre sèche, de pH voisin de 6,0, riche en matière organique (6 p. 100) et faiblement pourvue en argile (15 p. 100). Il y a deux pots par traitement et les doses apportées sont les suivantes :

— 0,5 p. p. m. soit environ 1,5 kg Se/ha et 3,28 kg/ha de sélénite de sodium,
— 1 p. p. m. soit environ 3 kg Se/ha et 6,56 kg/ha de sélénite de sodium,
— 2 p. p. m. soit environ 6 kg Se/ha et 13,12 kg/ha de sélénite de sodium,
— 4 p. p. m. soit environ 12 kg Se/ha et 26,24 kg/ha de sélénite de sodium.

Quatre cultures de ray-grass et trois cultures de maïs se sont succédées alternativement, le tout sur une période proche de 5 ans.

Le tableau 8 (1er essai) donne les teneurs des diverses récoltes de ray-grass

TABLEAU 8

Enrichissement en sélénium du ray-grass et du maïs par incorporation de sélénite de sodium à la terre des pots. 1er essai (en p. p. m. de Se/M. S.)

Selenium enrichment of rye-grass and maize by incorporation of sodium selenite into the soil of pots. First essay (p. p. m. Se in dry matter)

	Témoin	+ 0,5 p. p. m. Se	+ 1 p. p. m. Se	+ 2 p. p. m. Se	+ 4 p. p. m. Se
Ray-grass					
1re coupe 21/9/1973	0,070	0,900	2,050	**4,500**	**10,400**
2e coupe 30/10/1973	0,050	0,420	1,100	2,050	**5,100**
3e coupe 12/2/1974	0,085	0,250	0,490	0,950	2,130
4e coupe 26/4/1974	0,065	0,095	0,180	0,320	0,590
Maïs coupe 11/7/1974.....	0,040	0,075	0,140	0,270	0,580
Ray-grass					
1re coupe 18/12/1974	0,035	0,060	0,100	0,140	0,270
2e coupe 17/3/1975	0,030	0,060	0,110	0,220	0,350
3e coupe 5/5/1975	0,030	0,078	0,141	0,243	0,363
Maïs coupe 1/7/1975.....	0,013	0,034	0,062	0,103	0,242
Ray-grass					
1re coupe 3/11/1975	0,015	0,035	0,055	0,092	0,208
2e coupe 12/1/1976	0,035	0,098	0,127	0,253	0,497
3e coupe 22/3/1976	0,046	0,079	0,103	0,159	0,259
4e coupe 30/4/1976	0,041	0,060	0,096	0,136	0,212
Maïs coupe 1/7/1976.....	0,017	0,051	0,091	0,206	0,289
Ray-grass					
1re coupe 31/5/1977	0,044	0,054	0,096	0,128	0,236
2e coupe 7/7/1977	0,029	0,091	0,127	0,200	0,450
3e coupe 8/8/1977	0,035	0,075	0,152	0,243	0,494
4e coupe 8/9/1977	0,056	0,122	0,212	0,313	0,670
5e coupe 4/11/1977	0,070	0,141	0,195	0,298	0,629
6e coupe 23/2/1978	0,083	0,138	0,178	0,275	0,623

effectuées au stade pâturage ainsi que les teneurs du maïs à un stade herbacé précédant la floraison mâle.

Les enrichissements en sélénium sont très nets pour toutes les doses. Les teneurs dépassent le seuil de toxicité dans les deux premières récoltes de ray-grass pour la dose 4 p. p. m. La première récolte risque, elle aussi, d'être toxique même pour la dose 2 p. p. m.

Les teneurs décroissent rapidement au cours des exploitations successives puis restent sensiblement constantes. Pour la dose 1 p. p. m., le ray-grass contient encore 0,1 p. p. m. de sélénium après 5 ans alors que le témoin en contient nettement moins.

Une seconde expérience en pots (2e essai) a été mise en place au printemps 1975 sur une culture de ray-grass d'Italie suivie d'un maïs puis d'une luzerne, avec un sol un peu plus riche en argile et de pH un peu plus élevé.

TABLEAU 9

Enrichissement en sélénium des plantes fourragères par incorporation de sélénite de sodium à la terre des pots. 2e essai (en p. p. m. de Se/M. S.)

Selenium enrichment of forage plants by incorporation of sodium selenite into the soil of pots. Second essay. (p. p. m. Se in dry matter)

	Témoin	+ 0,5 p. p. m. Se	+ 1 p. p. m. Se	+ 2 p. p. m. Se	+ 4 p. p. m. Se
Ray-grass					
1re coupe 3/6/1975	0,133	1,210	2,900	**6,480**	**14,700**
2e coupe 1/7/1975	0,048	0,840	2,070	3,360	**7,200**
3e coupe 28/7/1975	0,046	0,275	0,592	1,520	4,010
4e coupe 25/8/1975	0,056	0,297	0,516	1,437	3,140
5e coupe 13/10/1975	0,124	0,165	0,215	0,357	1,080
6e coupe 25/2/1976	0,099	0,158	0,244	0,436	0,890
7e coupe 15/4/1976	0,046	0,093	0,169	0,460	0,900
Maïs coupe 1/7/1976.....	0,033	0,075	0,120	0,226	0,514
Luzerne					
1re coupe 7/7/1977	0,055	0,147	0,298	0,559	1,122
2e coupe 11/10/1977	0,052	0,086	0,134	0,237	0,366

Nous constatons, comme dans le premier essai, que les deux premières récoltes de ray-grass contiennent des taux trop élevés de sélénium pour les doses 2 et 4 p. p. m.

Les teneurs en sélénium du maïs sont voisines de celles du premier maïs de l'essai précédent.

Deux ans après la mise en place de l'essai, la luzerne s'enrichit encore très nettement puisque, pour la dose 4 p. p. m., la teneur de la première coupe est multipliée par 20 par rapport à celle du témoin.

Nos essais en pots permettent de conclure qu'une addition de 1 p. p. m. de Se enrichit un ray-grass italien au moins à 0,1 p. p. m., encore après 5 ans, sans risque de produire un fourrage toxique la première année.

Plusieurs auteurs ont étudié l'action, sur les fourrages, d'apports de sélénium au sol. Voici quelques-unes de leurs conclusions.

Cary, Wieczorek et Allaway (1967), au cours d'essais en pots contenant huit sols différents, obtiennent, dans cinq cas sur huit, des teneurs toxiques dans la luzerne après apport de 2,5 p. p. m. de Se sous forme d'acide sélénieux. Avec un apport de 0,5 p. p. m., les teneurs sont inférieures au seuil de toxicité sauf dans un cas pour les trois premières coupes.

Bisbjerg et Gissel-Nielsen (1969) expérimentant sur du ray-grass pérenne, signalent, après apport de 0,1, 0,5 et 2,5 p. p. m. de Se^{4+} à la terre des pots, les teneurs suivantes en sélénium : 0,28, 1,9 et 15,5 p. p. m. respectivement.

Levesque (1974) d'après des expériences en pots avec incorporation de sélénite de sodium au sol, écrit : « l'addition de sélénium sous forme de sélénite au taux de 1,5 p. p. m. s'est révélée adéquate pour maintenir une teneur satisfaisante chez la luzerne cultivée sur un sol limoneux et sur un sol argileux. Après quinze mois de croissance intensive, l'effet du sélénite est encore bien marqué et promet de se prolonger au-delà ».

2. *Pulvérisations foliaires.*

Nous avons pulvérisé, sur du ray-grass italien (variété Tiara), des solutions de sélénite de sodium, de concentrations différentes, à raison de 1 200 l/ha. Les parcelles élémentaires, d'une surface de 4 m^2, sont disposées en carré latin : quatre traitements, apport de 0, 35, 70, 140 g/ha de Se, quatre répétitions. Les pulvérisations ont été effectuées, soit immédiatement après la coupe, au stade pâture, d'un ray-grass en place depuis plusieurs mois (1er essai), soit sur un ray-grass venant d'être semé et ayant terminé son tallage avec des feuilles d'une longueur d'environ 10 cm (2e essai).

Les quatre exploitations suivant ces pulvérisations ont été effectuées au stade pâturage sauf la quatrième coupe du premier essai effectuée au stade épiaison.

On voit, sur le tableau 10, que la pulvérisation faite sur un ray-grass présentant une grande surface foliaire provoque un enrichissement de l'exploitation suivante très supérieur à celui obtenu en pulvérisant une parcelle venant d'être fauchée : pour la dose 140 g/ha, la teneur du témoin est multipliée par 72,9 contre 27,6. Nous avons montré, pour le cobalt, l'importance, pour l'enrichissement de la plante, de la surface foliaire au moment de la pulvérisation (Coppenet *et al.*, 1972).

Dès l'exploitation suivante, le taux d'enrichissement diminue beaucoup, il n'est plus que de 1,7 dans la quatrième coupe (2e essai).

La dose de 70 g Se/ha permet d'obtenir une teneur égale ou supérieure à 0,10 p. p. m. dans la matière sèche du ray-grass jusqu'à la quatrième exploitation sans risque de teneur toxique pour le bétail à la première récolte suivant la pulvérisation.

Pour d'autres régions et d'autres plantes voici les données bibliographiques que nous avons consultées :

Grant (1965), avec pulvérisation de sélénium, sous forme de sélénite, sur un mélange de graminées et de trèfle blanc, obtient, à la première coupe six semaines après, une teneur de 1,2 p. p. m. pour la dose 70 g/ha de Se. Au bout d'un an, elle est de 0,1 p. p. m.

Davies et Watkinson (1966), après arrosage de pâtures constituées d'agrostis, dactyle, ray-grass et trèfle blanc avec des solutions d'acide sélénieux de diverses concentrations, signalent que la dose 70 g/ha/an de sélénium sous forme de sélénite

TABLEAU 10

Enrichissement en sélénium du ray-gras sous l'action de pulvérisations foliaires de sélénité de sodium

Selenium enrichment of rye-grass by foliar applications of sodium selenite

	Témoin		35 g Se/ha		70 g Se/ha		140 g Se/ha	
1er essai								
Coupe le 30/9/1975 Pulvérisation le 1/10/1975	p. p. m. Se/M. S.	indice	p. p. m. Se/M. S.	indice	p. p. m. Se/M. S.	indice	p. p. m. Se/M. S.	indice
1re coupe 10/12/1975	0,056	1	0,371	6,6	0,759	13,5	1,547	27,6
2e coupe 1/4/1976	0,074	1	0,117	1,6	0,169	2,3	0,293	3,9
3e coupe 7/5/1976	0,049	1	0,097	1,9	0,106	2,1	0,164	3,3
4e coupe (épiée) 2/6/1976	0,055	1	0,090	1,6	0,131	2,4	0,198	3,6
2e essai								
Semis le 14/4/1977 Pulvérisation le 2/6/1977	p. p. m. Se/M. S.	indice	p. p. m. Se/M. S.	indice	p. p. m. Se/M. S.	indice	p. p. m. Se/M. S.	indice
1re coupe 29/6/1977	0,065	1	1,475	22,6	2,710	41,6	**4,740**	72,9
2e coupe 10/8/1977	0,054	1	0,159	2,9	0,266	4,9	0,541	10
3e coupe 29/9/1977	0,082	1	0,128	1,5	0,192	2,3	0,265	3,2
4e coupe 19/12/1977	0,097	1	0,115	1,2	0,135	1,4	0,164	1,7

est un moyen sûr et efficace pour obtenir des teneurs en sélénium des herbages entre 0,05 et 1 p. p. m.

Gissel-Nielsen (1975) indique qu'un apport de 5 g/ha de sélénium, par pulvérisation de sélénite de sodium sur de jeunes plants de céréales (orge, blé, avoine) six semaines environ après le semis, est suffisant pour obtenir une teneur en sélénium des grains supérieure ou égale à 0,05 p. p. m. contre une teneur inférieure à 0,02 p. p. m. dans les témoins. Avec un apport de 50 g/ha de Se, la teneur en sélénium de l'orge est de : 0,5 p. p. m. pour le grain, 0,2 p. p. m. pour la paille.

Les deux premières références citées, concernant aussi des plantes prairiales, aboutissent à des conclusions en accord avec les nôtres.

Conclusion

Cette étude sur le sélénium dans les plantes fourragères a été conduite avec le même objectif et selon la même démarche que celles déjà effectuées pour le cobalt et le zinc (Coppenet *et al.*, 1972 ; Coppenet et Moré, 1973). Elle procède d'abord d'un point de vue d'approfondissement de nos connaissances générales sur les causes de variation des teneurs en oligoéléments des organes végétatifs de diverses plantes cultivées : causes naturelles et facteurs culturaux. Elle répond, également, à un souci d'application zootechnique immédiate en cherchant à mieux rationnaliser l'utilisation des « compléments minéraux » destinés aux ruminants.

En Bretagne occidentale, les « valeurs minérales » des deux plantes ayant le plus contribué à l'intensification fourragère (ray-grass italien et maïs) sont assez bien connues aujourd'hui mais il n'en est pas de même dans toutes les régions françaises où un effort important reste à faire en ce sens. Les tables de la valeur alimentaire des fourrages dont nous disposons sont assez complètes pour ce qui est des quantités ingérées, des matières azotées, des unités fourragères et des teneurs en P, Ca et Mg. Elles sont, par contre, très incomplètes pour les autres minéraux et les oligoéléments.

Les teneurs en sélénium de la matière sèche de plusieurs centaines d'échantillons de ray-grass et de maïs sont pratiquement toutes comprises entre 0,020 et 0,100 p. p. m. Les moyennes sont très voisines de 0,030 pour le maïs ensilage, de 0,035 pour les foins et de 0,050 pour les herbes au stade pâture. Ces teneurs sont, pour la plupart des échantillons, très inférieures aux recommandations zootechniques mais elles sont en accord avec d'autres résultats analytiques français ou étrangers.

Les graminées au stade pâture sont plus riches en sélénium qu'au stade floraison-épiaison et, par ailleurs, cette teneur s'accroît au fur et à mesure des pâturages successifs d'une même année, comme cela a déjà été mis en évidence pour le cuivre, le cobalt, le manganèse et le zinc.

L'incidence de la fertilisation peut se résumer ainsi :

— le chaulage accroît le taux de sélénium dans le ray-grass alors que cet accroissement n'a pu être mis en évidence pour le maïs plante-entière,

— par rapport au nitrate d'ammoniaque le nitrate de chaux enrichit le ray-grass en sélénium alors que le sulfate d'ammoniaque l'appauvrit,

— l'effet de la dose d'engrais azoté, quel qu'il soit, n'est pas significatif dans nos expérimentations.

L'action du chaulage et des engrais azotés est donc pour le sélénium, l'inverse de celle qui est observée pour les oligoéléments métalliques : manganèse, zinc, cuivre, cobalt.

Trois engrais phosphatés différents appliqués en couverture ne font pas varier la teneur en sélénium alors qu'ils élèvent nettement la teneur en phosphore du ray-grass au stade pâture.

Le sélénite de sodium incorporé intimement à toute la masse de terre de vases de végétation, à raison de 1 p. p. m. Se (soit environ 6,5 kg de sélénite/ha), enrichit encore le ray-grass italien à 0,100 p. p. m. Se/M.S. cinq ans après l'incorporation, sans risque de produire un fourrage toxique la première année.

Le sélénite de sodium en pulvérisation foliaire très diluée, apportant 70 g Se/ha, permet d'obtenir une teneur égale ou supérieure à 0,100 p. p. m. Se dans la matière sèche du ray-grass jusqu'à la quatrième exploitation sans risque de teneur toxique à la première récolte suivant la pulvérisation.

Ces derniers résultats sont intéressants pour le domaine des connaissances générales mais seront difficilement applicables à la pratique agricole étant donné la haute toxicité des sels de sélénium et leur prix actuel. Le sélénium est, en effet, inscrit au tableau A des substances toxiques employées en agriculture ; son achat est restreint et son usage est soumis à une législation du travail particulière. Par ailleurs, l'esprit des législations européennes ou américaines tend à interdire l'enrichissement des aliments des animaux domestiques au-delà de 0,5 mg Se/kg M. S. Le sélénium pourrait en effet s'accumuler dans les carcasses et être toxique à long terme pour l'homme.

Reçu pour publication en février 1980.

Remerciements

Nous remercions Messieurs Trocmé (Laboratoire d'agronomie, C.N.R.A. de Versailles) et Lamand (Laboratoire des maladies nutritionnelles, C.R.Z.V. de Theix) pour les conseils judicieux qu'ils nous ont donnés lors de la rédaction de ce mémoire.

Summary

Selenium contents of forage plants
Effects of fertilization and selenite applications

Selenium determinations on several hundreds of forage plants harvested in Brittany were carried out, mostly with Italian ray-grass and whole maize plants. The soils that yielded these forage crops were of granitic or shaly origin, i. e., highly desaturated soils whose pH(H_2O) was increased by means of lime fertilizers, up to 6.0 to 6.2.

Virtually all the resulting contents ranged from 0.020 to 0.100 p. p. m. of selenium as compared with dry matter, the averages being 0.030 for whole maize-plants, 0.035 for Italian ray-grass hays and 0.050 for pasture-stage ray-grass. These data match pretty well with those achieved by various foreign and French researchers.

The authors of this paper have investigated, in the open field and by pot experiments, the effects of various fertilizers on selenium contents. Increasing the pH from 5.2 to 6.5 augments significantly the selenium content of the pasture-stage Italian ray-grass. Effect of the amount of nitrogen is slight but, when compared with ammonium nitrate, ammonium sulphate causes the selenium content of Italian ray-grass to decrease whereas calcium nitrate increases it. Ammonium nitrate steps up the yields without reducing the selenium content of pasture-stage Italian ray-grass. While ammonium sulphate increases the yields it tends to curtail the selenium content. Three different phosphatic fertilizers applied as top dressings do not affect this content but do raise the phosphorus content of pasture-stage ray-grass.

Sodium selenite thoroughly mixed with all the soil of the experimental pots at the rate of 1 p. p. m. of selenium, i. e., about 6.5 kg of selenite per hectare, enriches Italian ray-grass to 0.100 p. p. m. of

Se/M. S. within five years of its application with no chance of yielding a poisonous fodder crop the first year.

Highly-diluted foliage-sprayed sodium selenite at the rate of 70 g of Se per hectare provides a content equal to or greater than 0.100 p. p. m. of Se in the ray-grass dry matter up to the fourth cut with no chance of a poisonous content in the first crop following the spraying.

These results have great informational value but are hardly applicable to farming in view of the toxic properties of selenium salts and its no less high price.

Zusammenfassung

Selengehalt der futterpflanzen
Einfluss der fruchtbarmachung und der senelitangebote

Die Selendosierung wurde auf mehreren hundert Proben, in der westlichen Bretagne geernteten Futterpflanzen ausgeführt, vorallem auf italienischen Raygrass und ganzen Maisstengeln. Die Böden welche diese Futterpflanzen erzeugt baden sind granitischem oder schiefrigen Ursprungs, das heisst sehr sättigungsfreie Böden deren pH(H_2O), durch kalkhaltige Bodenverbesserungen, bis zu 6,0-6,2 gesteigert wurden.

Die festgestellten Gehalte liegen praktisch alle zwischen 0,020 und 0,100 p. p. m. Selen im Verhältnis zur Trockensubstanz. Die Mittelwerte stellen sich auf 0,030 für die ganzen Maisstengel, auf 0,035 für die italienischen Raygrassheue und auf 0,050 für das Raygrass im Weidestadium. Diese Werte stehen in Einklang mit einer gewissen Anzahl von Ergebnissen, die von französischen oder ausländischen Forschern erzielt wurden.

Durch Feldversuche oder in Pflanzentöpfen, wurde der Einfluss verschiedener Fruchtbarmacher auf die Selengehalte untersucht. Die Steigerung des pH von 5,2 auf 6,5 bewirkt eine signifikante Zunahme der Selenbereicherung des italienischen Raygrass im Weidestadium. Die Wirkung der Stickstoffdose ist nicht signifikant, aber bezogen auf Ammonsalpeter bewirkt das Ammoniumsulfat eine Abnahme des Selengehaltes des italienischen Raygrasse, während der Kalksalpeter eine Zunahme dieses Gehaltes bewirkt. Der Ammonsalpeter steigert die Erträge, ohne den Selengehalt des italienischen Raygrasses im Weidestadium herabzusetzen. Das Ammonium sulfat steigert die Erträge, hat jedoch die Tendenz den Selengehalt herabzusetzen. Drei verschiedene angewandte Phosphatdünger, als Bedeckung, bewirken keine Anderung des Selengehaltes, während dieselben den Phosphorgehalt des Raygrass im Weidestadium deutlich steigern.

Das mit der Erdmasse der Pflanzentöpfe eng vermischte Natriumselenit im Verhältnis von 1 p. p. m. Selen (ungefähr 6,5 kg Selenit pro Hektar) bereichert zudem das italienische Raygrass auf 0,100 p. p. m. SE/M. S. fünf Jahre nach der Zugabe, ohne Gefahr ein giftiges Futtermittel im ersten Jahr zu erzeugen.

Das Natriumselenit als sehr verdünnte Blattbestäubung, 70 g Se pro Hektar bringend, erlaubt ein Gehalt gleich oder höher als 0,100 p. p. m. SE in der Trockensubstanz des Raygrass bis zur vierten Ausbeutung zu erzielen, ohne Gefahr eines giftigen Gehaltes bei der ersten Ernte nach der Bestäubung.

Die letzteren Ergebnisse sind von Interesse im Bereich der allgemeinen Kenntnisse, werden jedoch in landwirtschaftlicher Praxis wegen der grossen Giftigkeit der Selensalze und deren heutigen Preis mit Schwierigkeit anzuwenden sein.

РЕЗЮМЕ

Содержание селена в кормовых растениях. Влияние удобрений и внесения селенита.

Определилось количество селена в нескольких сотнях образцов кормовых растений (в основном итальянский райграс и целые растения кукурузы), собранных в Западной Бретани. Эти кормовые растения росли на чрезмерно ненасыщённых гранитных или сланцевых почвах. Известковые удобрения повысили pH(H_2O) до 6-6,2.

Содержание селена колеблется от 0,020 до 0,100 $\times$ 10^{-6} (в среднем, 0,030 для целых растений кукурузы, 0,035 для сена итальянского райграса, 0,050 для потребляемого райграса). Эти результаты подтверждаются данными других французских и иностранных учёных.

В польских опытах и в вегетационных сосудах, авторы изучали влияние разных удобрений на содержание селена. Повышение pH до 6,5 вызывает значительное увеличение содержания селена в потребляемом итальянском райграсе. Влияние количества азота является незначительным но, в сравнении с нитратом аммония, сульфат аммония уменьшает содержание селена в итальянском райграсе в то время как нитрат кальция увеличивает его. Нитрат аммония увеличивает урожайность, не уменьшая содержания селена в потребляемом итальянском райграсе;сульфат аммония увеличивает урожайность но уменьшает содержание селена. Три разного поверхностного фосфорного удобрения не изменяют содержания селена, но значительно увеличивают содержание фосфора в потребляемом райграсе.

Когда селенит натрия тесно включается в землю вегетационных сосудов (I часть селена на миллион частей земли = 6,5 кг селенита/га), содержание Se в итальянском райграсе составляет $0{,}100 \times 10^{-6}$ 5 лет лосле включения. Тем не менее, корм не является токсическим в первый год.

Опрыскивание листьев селенитом натрия (70 г на га) даёт содержание выше $0{,}100 \times 10^{-6}$ в сухом веществе райграса до четвёртого урожая, всё-таки содержание первого урожая после опрыскивания является безопасным.

Эти результаты-важны как общие познания, но трудно их применить на практике, принимая во внимание высокую токсичность и настоящую пену солей селена.

Références bibliographiques

ARVY M. P., LAMAND M., BONNEMAIN J. L. 1974. Teneur en sélénium de quelques légumineuses et graminées cultivées dans le Limousin. *C. R. Acad. Agri.*, **63,** 481-489.

BELLANGER J., PÉRIGAUD S., LAMAND M., 1973. Carences en oligo-éléments chez les ruminants en France, III. Eléments d'enquête obtenus par les analyses de fourrages. *Ann. Recher. Vétér.*, **4** (4), 565-598.

BISBJERG B., GISSEL-NIELSEN G., 1969. The uptake of applied selenium by agricultural plants. The influence of soil type and plant species. *Plant soil*, **31** (2), 287-298.

CARTER D. L., ROBBINS C. W., BROWN M. J., 1972. Effect of phosphorus fertilization on the selenium concentration in alfalfa. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36,** 624-627.

CARY E. E., WIECZOREK G. A., ALLAWAY W. H., 1967. Reactions of selenite-selenium added to soils that produce low-selenium forages. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31,** 21-26.

CARY E. E., ALLAWAY W. H., 1969. The stability of different forms of selenium applied to low-selenium soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33,** 571-574.

COPPENET M., 1964. Sur les variations de la composition minérale des graminées fourragères exploitées en régime de pâturage. *C. R. Acad. Agri.*, 330-344.

COPPENET M., 1972. Composition minérale des maïs récoltés dans le Finistère. *Fourrages*, **49,** 53-72.

COPPENET M., MORÉ É., LE CORRE L., LE MAO M., 1972. Variations de la teneur en cobalt des ray-grass. Etude de techniques d'enrichissement. *Ann. Agron.*, **23** (2), 165-196.

COPPENET M., 1973. Fertilisation intensive et qualité des fourrages bretons. *Bull. Tech. Inf.*, **281,** 583-591.

COPPENET M., MORÉ É., 1973. Sur les teneurs en zinc du ray-grass et du maïs. *C. R. Acad. Agri.*, 487-496.

DAVIES E. B., WATKINSON J. H., 1966. Uptake of native and applied selenium by pasture species. *N. Z. J. Agric. Res.*, **9,** 317-327.

DUCHAIGNE A., ARVY M. P., 1978. Le sélénium en biologie. *Ann. Biol.*, **17** (11-12), 529-556.

EHLIG G. F., ALLAWAY W. H., CARY E. E., 1968. Differences among plant species in selenium accumulation from soils low in available selenium. *Agron. J.* **60,** 43-47.

GEERING H. R., CARY E. E., JONES L. H. P., ALLAWAY W. H., 1968. Solubility and redox criteria for the possible forms of selenium in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32,** 35-40.

GISSEL-NIELSEN G., 1971. Influence of pH and texture of the soil on plant uptake of added selenium. *J. Agr. Food Chem.*, **19** (6), 1165-1167.

GISSEL-NIELSEN G., 1975. Foliar application and pre-sowing treatment of cereals with selenite. *Z, Pflanzenern. Bodenk.* (1), 97-105.

GRANT A. B., 1965. Pasture top-dressing with selenium. *N. Z. J. Agric. Res.*, **8,** 681-690.

GUPTA U. C., WINTER K. A., 1975. Selenium content of soils and crops and the effects of lime and sulphur on plant selenium. *Can. J. Soil Sci.*, **55** (2), 161-166.

HURD-KARRER A. M., 1938. Relation of sulphate to selenium absorption by plants. *Amer. J. Bot.*, **25,** 666-675.

JOHNSON C. M., 1976. Selenium in the environment. *Res. Rev.*, **62,** 101-130.

LAMAND M., 1969. Dosage du sélénium dans les produits biologiques et mélanges minéraux alimentaires. *Ann. Fals. Exp. Chim.* (1), 4-12.

LAMAND M., 1970. Expansion de la myopathie en France en liaison avec la carence en sélénium des fourrages. *C. R. Acad. Agri.*, **56,** 604-610.

LEVESQUE M., 1974. Some aspects of selenium relationships in Eastern Canadian soils and plants. *Can. J. Soil Sci.*, **54,** 205-214.

LESSARD J. R., HIDIROGLOU M., 1968. Intra-seasonal variations in the selenium content of various forage crops at Kapuskasing, Ontario. *Can. J. Plant Sci.*, **48,** 581-585.

MORÉ É., COPPENET M., LE CORRE L., 1975. Teneurs en sélénium des plantes fourragères récoltées dans le Finistère. Enrichissement du ray-grass et du maïs par apport de sélénite au sol. *C. R. Acad. Agri.*, **61,** 870-880.

WATKINSON J. H., 1966. Fluorometric determination of selenium in biological material with 2-3 diaminonaphtalene. *Anal. Chem.*, **38** (1), 92-97.

Ann. agron., 1980, **31** (3), 319-336.

Etude technique et économique de la valorisation de l'irrigation du maïs (région Toulousaine)

M. CABELGUENNE

Station d'agronomie
Centre de Recherches agronomiques de Toulouse, I.N.R.A.,
B. P. 12, 31320 *Castanet-Tolosan*

Résumé

Nous avons tenté de modéliser le processus de valorisation de l'eau par les plantes à partir des comportements de leur réponse à l'eau (Robelin, 1958 ; Maertens, 1973 ; Puech, 1974) et avons choisi le maïs pour illustrer le modèle.

— Dans une première hypothèse, nous supposons gratuite l'eau nécessaire aux besoins du maïs, ce qui permet, compte-tenu des quantités d'eau consommées selon deux types d'irrigation pratiquées (irrigation tendant vers la satisfaction des besoins et irrigation période critique) de déterminer des droites de réponses technico-économiques (fig. 5) exprimant l'importance des marges brutes maximales obtenues en fonction de l'accroissement de la disponibilité hydrique.

Ainsi, l'efficacité du millimètre d'eau utilisé en période critique se traduit par une rentabilité maximale supérieure (28,05 F/mm) à celle de la satisfaction totale des besoins (22,35 F/mm) ; cependant, la marge brute maximale en satisfaction des besoins reste supérieure à celle du maïs période critique (5 115 F contre 4 386 F).

— Dans une deuxième hypothèse, nous prenons en compte le coût de l'irrigation à trois niveaux de disponibilités hydriques naturelles inférieurs aux besoins du maïs (tabl. 1, 2, 3). Les marges brutes maximales « eau gratuite » sont d'autant plus diminuées que les coûts sont importants, donc les niveaux de disponibilités hydriques naturelles plus faibles (tabl. 4).

La rentabilité de l'irrigation diminue au fur et à mesure que les coûts augmentent, selon des droites de la forme $y = -ax + b$ (fig. 5) mais avec des coefficients de régression d'autant plus petits que les apports sont importants.

L'étude comparative des deux types d'irrigation (satisfaction totale des besoins ou période critique) a permis de dégager la rentabilité du millimètre d'eau provenant de l'irrigation et les suppléments de marges brutes en fonction des apports (fig. 7), et de déterminer les limites de l'intérêt de l'irrigation période critique selon la disponibilité hydrique naturelle et les coûts d'irrigation (fig. 8).

Introduction

Le développement des grandes cultures paraît être dans la conjoncture actuelle un atout important pour les zones subhumides telles que la région toulousaine (Sud-Ouest de la France) ; mais le manque d'eau risquant de devenir le principal facteur limitant, il est nécessaire de rechercher les solutions possibles concernant la valorisation optimale des ressources en eau.

Les travaux concernant les modalités d'utilisation de l'eau par les plantes ont permis de dégager un certain nombre de concepts : réponses à l'eau et efficience de l'eau consommée (Puech et Maertens, 1974 ; Marty *et al.*, 1975 ; Puech *et al.*, 1976),

pouvoirs d'extraction de l'eau du sol par les plantes (Maertens et Cabelguenne, 1979), susceptibles d'apporter des éléments de réponses au problème général de la valorisation de l'irrigation.

— Cette valorisation peut se concevoir à différents niveaux : nombreuses sont les études économiques concernant des propositions de méthodes de calculs englobant une culture étudiée dans un système de production (Attonaty, 1969 ; Cordonnier, 1976 ; Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne, 1976 ; I.G.E.R.-B.C.M.E.A., 1979) ; plus rares sont celles effectuées au niveau de « l'atelier de production » ; elles nous paraissent cependant indispensables à toute étude économique globale, compte-tenu des différences de comportements agronomiques propres à chaque espèce.

L'intérêt de la démarche technico-économique que nous proposons réside donc dans la considération de facteurs techniques peu pris en compte jusqu'à présent dans les études économiques. Le fonctionnement du modèle sera illustré à partir de données expérimentales par la culture diversement irriguée du maïs ; nous l'adapterons ultérieurement à d'autres grandes cultures, dans le but de hiérarchiser la rentabilité de l'irrigation selon les espèces, et compte-tenu du niveau de disponibilités hydriques pédo-climatiques locales.

I. — Notions de réponses à l'eau

A. — *Rappels*

De nombreux auteurs ont montré qu'il existait une relation étroite entre la production des cultures et leur consommation d'eau. C'est ainsi que Robelin et Mingeau (1970), puis Maertens (1973), Puech et Maertens (1974) ont établi que la relation entre le niveau de la production de matière sèche totale et la satisfaction des besoins exprimée par le rapport ETR/ETRM était linéaire et pouvait s'écrire :

$$\frac{\text{MST ETR}}{\text{MST ETRM}} = a \frac{\text{ETR}}{\text{ETRM}} \pm b \qquad (1)$$

MST ETR = Matière sèche totale produite en évapotranspiration réelle.
MST ETRM = Matière sèche totale produite en évapotranspiration réelle maximale.
ETR = Evapotranspiration réelle de la culture.
ETRM = Evapotranspiration réelle maximale de la culture.

Cette équation peut s'appliquer sans les coefficients a et b à une espèce particulière dans les conditions courantes de culture en intégrant les termes « constants » que sont MST ETRM et ETRM dans différentes situations culturales.

On obtient ainsi l'équation (2) de Robelin (1958) :

$$\text{MST} = a\ \text{ETR} \pm b\ . \qquad (2)$$

B. — *Production grains. Produit brut/Disponibilité hydrique pédo-climatique*

Il a été vérifié que pour certaines cultures et notamment le maïs, l'équation (2) pouvait s'appliquer à la production de grains.

On peut transformer immédiatement cette régression reliant la production de grains à l'hectare, à l'alimentation en eau sur toute la période de végétation en une régression reliant le produit brut au même facteur.

L'alimentation en eau peut-être prise en première approximation comme égale à la disponibilité hydrique (exprimée en mm) représentée par l'ensemble des ressources naturelles provenant des réserves du sol et des pluies, aussi longtemps qu'elle reste inférieure ou égale à la consommation maximale de la culture ETRM.

On obtient alors les équations (3) et (4)

$$P.G. = a \text{ disponibilité} \pm b \quad (3)$$
$$P.B. = a \text{ disponibilité} \pm b\,. \quad (4)$$

Ainsi, à partir de la valeur de l'équation (2) de réponse à l'eau du maïs, hautement significative (de Naurois, 1973), $y = 1{,}73\,x - 0{,}73$, nous obtenons pour un maïs qui produirait 85 q/ha de grains secs et exigerait 520 mm d'eau (moyenne Auzeville sur 10 ans) :

$$P.G. = 0{,}28\,x - 62 \qquad \text{(fig. 1)}$$

P.G. = Production grains en q/ha.
x = Disponibilité hydrique en mm.

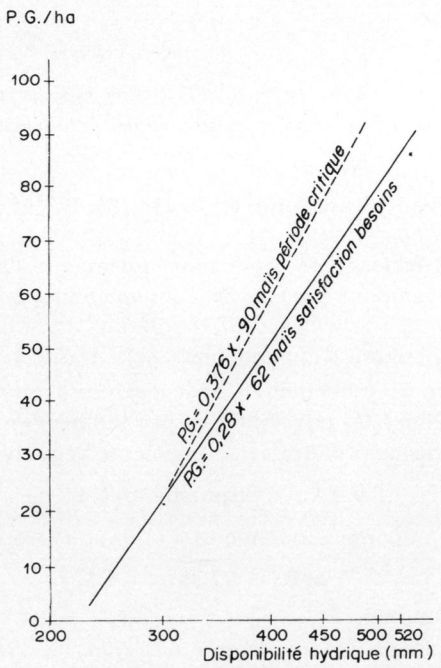


FIG. 1. — *Production grains* (q/ha) *selon la disponibilité hydrique pédoclimatique* (mm).
Grain yield (q/ha) *according to the pedoclimatic available water* (mm).

$$P.B. = 22{,}35\,x - 5\,0007 \text{ (fig. 2)}$$

P.B. = Produit brut en F/ha.
x = Disponibilité hydrique en mm.

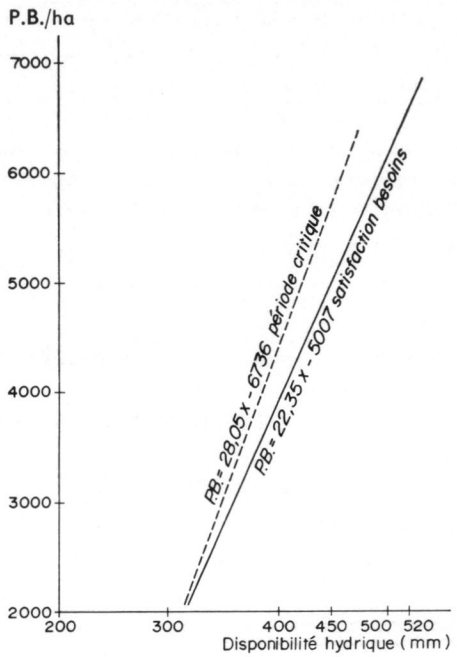


FIG. 2. — *Produit brut* (P. B./ha) *selon la disponibilité hydrique pédoclimatique* (mm).
Value production (F/ha) *according to the pedoclimatic available water* (mm).

II. — Approche économique : marge brute (M. B.) et produit brut (P. B.)

En considérant les facteurs de production autres que l'eau à l'optimum, nous avons retenu à titre d'exemple 1 500 F de charges variables, quelque soit le rendement escompté.

Notre première hypothèse étant que l'ensemble des réserves en eau et des pluies sont seules à participer à l'alimentation hydrique de la plante, il suffit d'ajouter à l'équation (4) qui représente les possibilités de produit brut en fonction de la disponibilité, le montant des charges culturales pour obtenir l'équation (5)

$$\text{M.B.} = \text{a disponibilité} \pm \text{b} \qquad (5)$$

exprimant la droite de réponse économique, qui dans notre exemple devient :

$$\text{M.B.} = 22{,}35\ x - 6\,507$$

et est représentée à la figure 3.

La deuxième hypothèse tiendra compte des coûts de l'irrigation, qui, selon les systèmes choisis, permettront d'en mesurer l'impact sur la diminution des marges brutes et d'aborder ainsi les problèmes de rentabilité.

Notre souci étant d'éviter de présenter un modèle de fonctionnement trop théorique, nous avons choisi comme exemple concret un maïs INRA 400, irrigué de deux manières :

a) irrigations tendant vers la satisfaction totale des besoins (SB),

b) irrigations limitées uniquement à la période critique (PC).

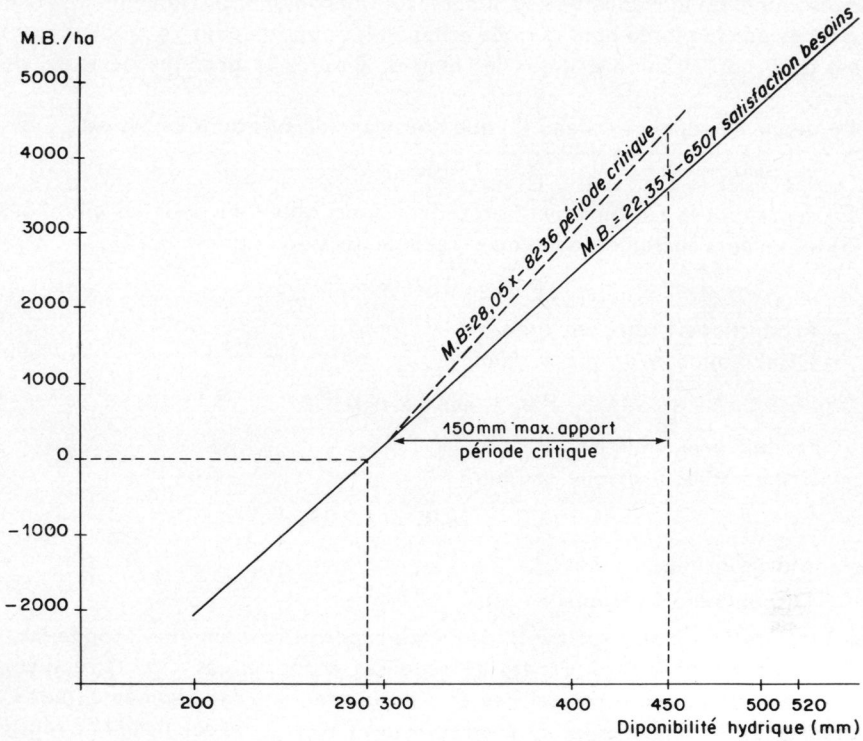


FIG. 3. — *Droites de réponses économiques : M. B./disponibilité hydrique pédo-climatique.*
Economic responses : gross margin (F/ha) *pedoclimatic available water.*

III. — Résultats

1re *hypothèse : Eau gratuite*

On peut observer (fig. 3) que la marge brute ne devient positive que pour une disponibilité égale à 290 mm, qui correspond à la quantité d'eau permettant une production grains couvrant l'ensemble des charges culturales variables.

Il y a cependant un cas particulier concernant l'irrigation en période critique, période au cours de laquelle un déficit en eau provoque une chute de rendement particulièrement importante ; la réponse à l'eau n'étant pas la même, nous sommes obligés de recalculer les différentes équations (3), (4), (5).

Faisons observer que les nouvelles régressions n'auront que des valeurs théoriques puisqu'il y a obligatoirement irrigation et que toute l'eau ne peut être gratuite. Cependant, ces régressions serviront ultérieurement pour la comparaison des deux modalités d'irrigation.

Ainsi, diverses expérimentations menées antérieurement (1965, 1966, 1967, Station d'agronomie) ont montré que la production moyenne maximale du maïs irrigué en période critique dans la région toulousaine se situe approximativement à 79 q pour

une consommation moyenne de 450 mm. En considérant que 300 mm en moyenne sont consommés par la plante hors période critique, les apports pour ce mode d'irrigation varient dans notre région et selon les années, d'après la pratique agricole, de 0 à 150 mm.

La droite de réponse à l'eau (2) que nous considérons dans ce cas est :

$$Y = 1{,}91\ x - 0{,}91\ .$$

En reprenant le raisonnement précédent, nous obtenons pour les équations (3), (4), (5) les valeurs suivantes, également représentées aux figures 1, 2, 3.

$$P.G. = 0{,}376\ x - 90$$

P.G. = Productions grains en q/ha.
x = Disponibilité hydrique en mm.

$$P.B. = 28{,}05\ x - 6\ 736$$

P.B. = Produit brut en F/ha.
x = Disponibilité hydrique en mm.

$$M.B. = 28{,}05\ x - 8\ 236$$

M.B. = Marge brute en F/ha.
x = Disponibilité hydrique en mm.

Cette dernière équation exprime la droite de réponse économique Période Critique.

En comparant les deux droites de réponses économiques (fig. 3) relatives aux deux types d'irrigation, il ressort que plus la disponibilité (x) augmente, plus l'écart de la marge brute obtenu entre les deux systèmes s'accroît : le coefficient de régression étant de 28,05 en période critique et de 22,35 en satisfaction totale des besoins. Ce coefficient de régression plus élevé se traduit par une plus grande efficacité du millimètre d'eau consommé, quoique les marges brutes maximales soient plus élevées dans le cas de la satisfaction totale des besoins (5 115 F contre 4 386 F).

2e *hypothèse* : *Introduction des coûts d'irrigation*

Les coûts du matériel d'irrigation variant beaucoup, il s'agit ici de les considérer uniquement à titre d'exemple.

Précisons que nous avons convenu de diminuer du montant des marges brutes maximales établies en « eau gratuite », la totalité des coûts d'irrigation (charges fixes + charges variables) : en effet, si l'on veut comparer le revenu d'une culture en situation irriguée à celui de la même culture en situation non irriguée, il convient de déduire de la marge brute de la culture irriguée *l'ensemble* des charges irrigations lui incombant.

Par ailleurs, cette démarche a seulement pour but de proposer une méthode permettant d'apprécier la valorisation de l'irrigation dans différentes situations pédo-climatiques ; de ce fait, nous n'avons pas tenu compte, par souci de simplification, des charges éventuelles de main d'œuvre consécutives au temps de travail nécessaire pour récolter le rendement supplémentaire dû à l'irrigation, ainsi que pour manipuler le matériel. Les chiffres de rentabilités ne seront donc à retenir qu'à titre indicatif et comparatif.

Nous avons choisi trois types d'installation représentant trois coûts différents (S.U.A.D. Haute-Garonne, Marty et Hilaire, 1979).

1) *Le système irrigué collectif*, qui, compte tenu des subventions, représente pour l'exploitant le système le moins cher, mais le plus coûteux pour la collectivité :

- Montant des charges fixes/ha, comprenant l'amortissement du matériel d'amenée d'eau et l'intérêt du capital : 415 F/ha.
- Montant des charges variables : 0,12 F/m³ utilisé.

2) *Le système individuel avec pompage en rivière* :

- Charges fixes/ha : 790 F.
- Charges variables : 0,26 F/m³.

3) *Le système individuel avec pompage en lac collinaire* :

- Charges fixes/ha : 1 000 F.
- Charges variables : 0,30 F/ha.

Les trois systèmes étant équipés selon un quadrillage total.

Les tableaux 1, 2, 3 représentent l'évolution des coûts de chaque système selon les apports. On constate que, ramenées au m³, les charges fixes diminuent au fur et à mesure de l'augmentation des apports ; les charges variables étant proportionnelles au nombre de m³ apportés, le coût total (C.F. + C.V.) du m³ utilisé est d'autant plus faible que les apports sont importants.

Enfin, les coûts totaux de l'irrigation augmentent compte-tenu des apports qui vont de 500 à 3 200 m³, et varient naturellement d'une installation à l'autre.

TABLEAU 1

Coûts d'irrigation selon les apports (1 mm = 10 m³/ha) :
cas d'une installation sur périmètre collectif avec quadrillage total

Irrigation cost according to the water quantity (1 mm = 10 m³) :
example of an installation on a collective aera with « total squaring »

Apports (mm)	Apports (m³)	Charges fixes (F/ha)	Charges fixes (F/m³)	Charges variables (F/m³)	C. F. + C. V. (F/m³)	Coûts selon les apports
50	500	415	0,83	0,12	0,95	475
100	1 000	415	0,415	0,12	0,535	535
120	1 200	415	0,346	0,12	0,466	559
150	1 500	415	0,276	0,12	0,396	594
200	2 000	315	0,207	0,12	0,327	654
220	2 200	415	0,189	0,12	0,309	679
250	2 500	415	0,166	0,12	0,286	715
300	3 000	415	0,138	0,12	0,258	774
320	3 200	415	0,130	0,12	0,250	799

TABLEAU 2

Coûts selon les apports (1 mm = 10 m³) :
cas d'une installation individuelle, pompage en rivière avec quadrillage total

Irrigation cost according to the water quantité (1 mm = 10 m³) :
example of an individual installation : pomp in river with total squaring

Apports (mm)	Apports (m³)	Charges fixes (F/ha)	Charges fixes (F/m³)	Charges variables (F/m³)	C. F. + C. V. (F/m³)	Coûts selon les apports
50	500	790	1,58	0,26	1,84	920
100	1 000	790	0,79	0,26	1,05	1 050
120	1 200	790	0,658	0,26	0,918	1 102
150	1 500	790	0,526 6	0,26	0,786 6	1 180
200	2 000	790	0,395 0	0,26	0,655 0	1 310
220	2 200	790	0,359 0	0,26	0,619 0	1 362
250	2 500	790	0,316 0	0,26	0,576 0	1 440
300	3 000	790	0,263 3	0,26	0,523 0	1 570
320	3 200	790	0,246 0	0,26	0,506 0	1 622

TABLEAU 3

Coûts d'irrigation selon les apports (1 mm = 10 m³/ha) :
cas d'une installation individuelle, pompage en lac collinaire, avec quadrillage total

Irrigation cost according to the water quantity (1 mm = 10 m³) :
example of an individual installation : pomp in hill lake with total squaring

Apports (mm)	Apports (m³)	Charges fixes (F/ha)	Charges fixes (F/m³)	Charges variables (F/m³)	C. F. + C. V. (F/m³)	Coûts selon les apports
50	500	1 000	2,00	0,30	2,30	1 150
100	1 000	1 000	1,00	0,30	1,30	1 300
120	1 200	1 000	0,833	0,30	1,133	1 360
150	1 500	1 000	0,666	0,30	0,966	1 450
200	2 000	1 000	0,50	0,30	0,80	1 600
220	2 200	1 000	0,45	0,30	0,754	1 660
250	2 500	1 000	0,40	0,30	0,70	1 750
300	3 000	1 000	0,333	0,30	0,633	1 900
320	3 200	1 000	0,312	0,30	0,612	1 960

A. *Irrigation tendant vers la satisfaction des besoins* (S.B.).

1. *Diminution des marges brutes.*

Les apports nécessaires (mm) pour la satisfaction des besoins du maïs seront fonction de la disponibilité hydrique pédo-climatique. Si nous prenons un maïs dont les besoins maxima (E.T.R.M.) sont de 520 mm, nous pouvons supposer trois cas :

1. Disponibilité hydrique de 200 mm, apport nécessaire par irrigation = 320 mm
2. Disponibilité hydrique de 300 mm, apport nécessaire par irrigation = 220 mm
3. Disponibilité hydrique de 400 mm, apport nécessaire par irrigation = 120 mm .

Les coûts de l'irrigation étant liés aux quantités à apporter (tabl. 1, 2, 3), les marges brutes seront d'autant plus petites par rapport à la droite de réponse économique (5) que l'irrigation sera importante.

Le tableau 4 chiffre l'impact des coûts de l'irrigation pour chaque système et chaque cas.

TABLEAU 4

Marges brutes obtenues en fonction des coûts de l'irrigation
Gross margin (F/ha) *according to irrigation cost*

Apports (mm)		coût/ha	M. B./ha
Eau gratuite		0	5 115
120 mm	(1) Perim. collectif	559	4 519
	Système individuel		
	(2) Rivière	1 102	4 013
	(3) Lac collinaire	1 360	3 755
220 mm	(1)	679	4 436
	(2)	1 362	3 753
	(3)	1 660	3 455
320 mm	(1)	799	4 316
	(2)	1 622	3 493
	(3)	1 960	3 155

2. *Rentabilité de l'irrigation.*

Nous appellerons rentabilité de l'irrigation (R) exprimée en francs/mm (F/mm), le rapport de la différence de marge brute obtenue en fonction des apports (mm) :

$$R = \Delta \frac{\text{M.B.}}{\text{apports}} = \text{F/mm} . \qquad (6)$$

En procédant à des apports dont l'importance variera en fonction de la disponibilité hydrique, nous obtenons pour chaque système pris en compte, les rentabilités suivantes (tabl. 5).

TABLEAU 5

Rentabilité (F/mm) *selon les systèmes d'irrigation*
Net return to water (F/mm) *according to irrigation systems*

Disponibilité (mm)	Apports (mm)	Rentabilité F/mm		
		Périmètre collectif	Pompage rivière	Pompage lac collinaire
200	320	19,84	17,27	16,22
220	300	19,76	17,11	16,01
270	250	19,48	16,58	15,34
320	200	19,08	15,79	14,34
370	150	18,37	14,47	12,70
420	100	17	11,83	9,33
470	50	12,84	3,92	— 0,68

Sur la figure 4, sont reproduites les variations de la rentabilité d'une culture de maïs irrigué en fonction des coûts de l'irrigation. Chaque droite représente les apports nécessaires pour la satisfaction des besoins qui varient selon l'importance de la disponibilité. L'origine, pour une valeur $X = 0$ est, pour toutes les droites, de 22,35 et

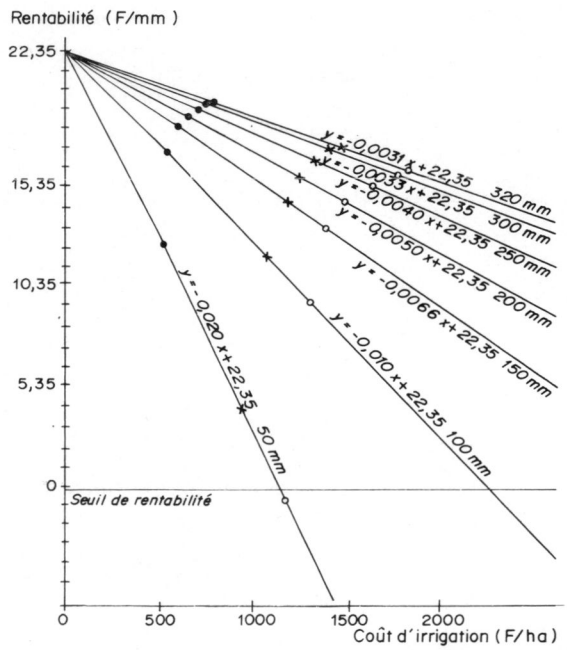


FIG. 4. — *Variation de la rentabilité* (F/mm) *selon les coûts de l'irrigation* (F/ha).
Variation of net return to water (F/mm) *according to irrigation cost* (F/ha).

représente la rentabilité maxima pour une hypothèse d'eau gratuite, soit le coefficient de régression de l'équation (5). Cette rentabilité diminue au fur et à mesure que le coût augmente, selon la forme $Y = -ax + b$.

Par contre, les coefficients a de régression sont d'autant plus petits que les apports sont importants : la relation apports-coefficient de régression est une hyperbole (fig. 5) ; en effet, les coefficients sont en valeur négative l'inverse des apports ; leurs diminutions représentant la variation de rentabilité sont moins que proportionnelles aux apports, ce qui signifie que plus ils sont importants, moins l'irrigation est sensible aux coûts.

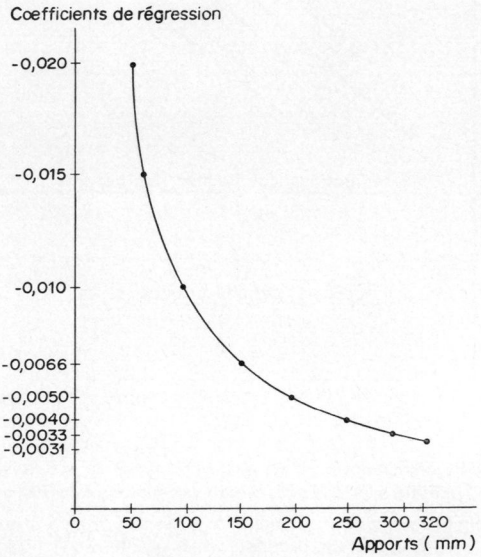


FIG. 5. — *Coefficients de régression de la variation de la rentabilité en fonction des apports.*
Regression coefficient of net return variation to water according to the water quantity.

Le seuil de rentabilité est atteint à des coûts d'autant plus faibles que les apports sont peu importants. Ainsi, on peut constater que pour un apport de 50 mm, il est atteint à un coût d'irrigation proche de 1 100 F, pour un apport de 100 mm, à un coût de 2 300 F...

Il est donc possible de prévoir pour divers systèmes envisagés, soit le coût de l'irrigation à ne pas dépasser, soit la disponibilité maximale pour que l'irrigation soit rentable compte tenu du coût, sachant que dans cette hypothèse on satisfait les besoins.

B. *Cas particulier de la période critique* (P.C.).

La figure 6 indique, compte tenu des coûts de l'irrigation, l'évolution des marges brutes obtenue en période critique, comparativement à l'irrigation satisfaction des besoins.

Nous avons vu plus haut les conditions nécessaires justifiant ce type d'irrigation, et que les apports maxima étaient de l'ordre de 150 mm. Par conséquent, nous comparerons les rentabilités des 220 mm d'irrigation satisfaction des besoins à celles des 150 mm période critique.

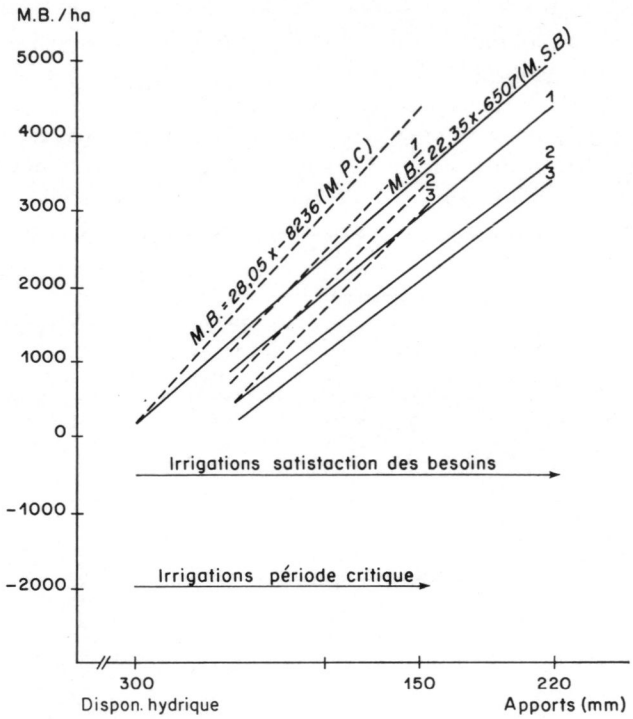


FIG. 6. — *Comparaison de l'évolution des M. B./ha des irrigations P. C. et S. B. selon les apports et pour une disponibilité hydrique pédoclimatique minimale de 300 mm.*

Evolution of the gross margin for irrigation P. C. and S. B. according to the water quantity and for a minimal pedoclimatic available water of 300 mm.

---- Irrigations période critique.
—— Irrigations satisfaction des besoins.
1. Périmètre collectif
2. Pompage rivière
3. Pompage lac collinaire
} quadrillage total.

1. *Supplément de marge brute obtenu en fonction des apports.*

Les apports en période critique varieront de 150 mm au maximum à 20 mm selon que la disponibilité pédo-climatique évoluera de 300 à 430 mm.

En satisfaction des besoins, ces apports varieront de 220 à 20 mm pour une disponibilité évoluant entre 300 et 500 mm.

La figure 7 montre l'importance des suppléments de marge brute obtenus pour les deux types d'irrigation selon les apports et comparativement à la droite de réponse économique. On constate : dans le cas du périmètre irrigué collectif 1. que les marges brutes obtenues en période critique représentent une rentabilité globale de 24 F/mm au lieu de 19,26 F/mm en satisfaction des besoins.

Dans le cas du système individuel, pompage en rivière 2. et lac collinaire 3., les rentabilités en période critique sont respectivement de 20,18 F/mm et 18,38 F/mm contre 16,16 F/mm et 14,80 F/mm en satisfaction des besoins. Ces chiffres illustrent

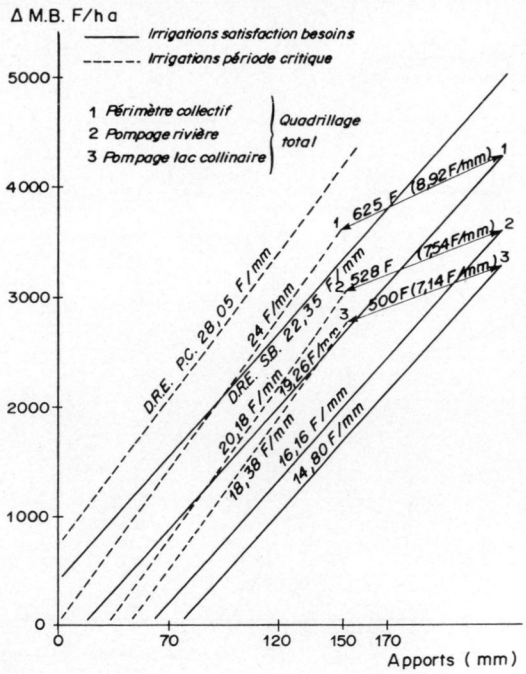


FIG. 7. — *Supplément de M. B.* (F/ha) *en fonction des apports comparativement aux droites de réponses économiques* (D.R.E.).

Supplement of gross margin according to the water quantity with regard to economic responses.

bien la plus grande efficacité relative de l'arrosage en période critique. Cette observation est encore plus nette, si on compare la rentabilité des 70 mm supplémentaires provenant de la différence des apports en satisfaction des besoins (220) et en période critique (150) : les marges brutes supplémentaires propres à chaque système, soit 625, 528, 500 F, correspondent à des rentabilités nettement inférieures à celles de la période critique : 1. = 8,92 F/mm au lieu de 24 F/mm ; 2. = 7,54 F/mm au lieu de 20,18 F/mm; 3. = 7,14 F/mm au lieu de 18,38 F/mm.

2. *Evolution de la rentabilité selon la disponibilité pédo-climatique.*

Nous avons vu que la rentabilité de l'irrigation augmentait au fur et à mesure des apports (fig. 4). Par conséquent, pour une disponibilité pédo-climatique élevée, nécessitant de faibles apports, il est intéressant de connaître la limite où il est plus avantageux d'irriguer en période critique plutôt qu'en satisfaction des besoins.

La figure 8 rend compte des choix possibles compte tenu de l'importance de la disponibilité et des types d'installations retenus : en effet, l'accroissement de la disponibilité ayant pour conséquence une réduction des apports, les marges brutes supplémentaires, ramenées au millimètre apporté seront également en diminution.

Sont donc représentées sur cette figure, les évolutions de la rentabilité (F/mm) en fonction de l'accroissement de la disponibilité pour les deux types d'irrigation, comparées à leurs droites de réponses économiques.

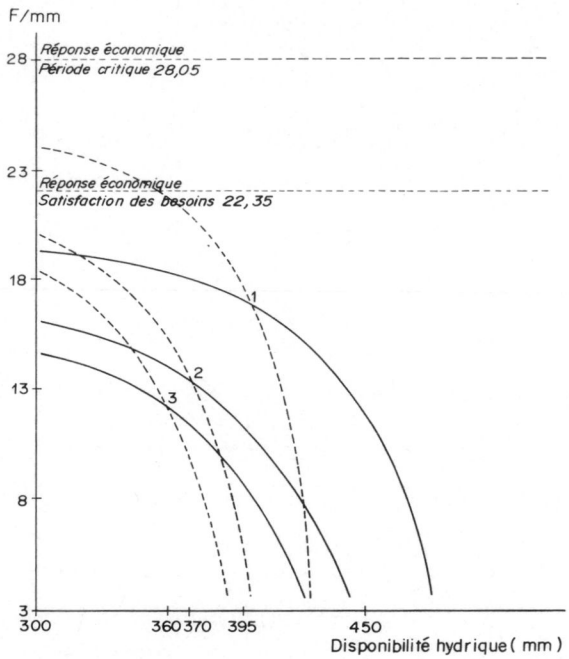


FIG. 8. — *Evolution comparative de la rentabilité* (F/mm) *du maïs selon la disponibilité hydrique pédo-climatique*

Comparative evolution of net return to water of corn (F/mm) *according to the pedoclimatic available water.*

---- Irrigations période critique.
—— Irrigations satisfaction des besoins.
1. Périmètre collectif
2. Pompage rivière } quadrillage total.
3. Pompage lac collinaire

On constate : en périmètre irrigué collectif 1., la rentabilité du millimètre d'eau période critique est meilleure que celle relative à la satisfaction des besoins pour des disponibilités comprises entre 300 et 395 mm ; au-delà du point d'intersection entre les deux courbes, c'est-à-dire à partir de fortes disponibilités de l'ordre de 400 mm, il est plus intéressant d'irriguer jusqu'à la satisfaction totale des besoins. En système individuel, pompage en rivière 2. ou en lac collinaire 3., les courbes de rentabilité période critique coupent celles de satisfaction des besoins respectivement à 370 mm et 360 mm de disponibilité.

Autrement dit, malgré une rentabilité globale du millimètre d'eau nettement supérieure en période critique, ce type d'irrigation n'est vraiment avantageux que si l'irrigant bénéficie d'un coût relativement faible. En effet, plus le coût est élevé, plus l'intérêt de l'irrigation période critique est réduit et dans le cas du lac collinaire, ne se justifie que pour une gamme de disponibilité comprise entre 300 et 360 mm.

IV. — Discussion

Pour illustrer notre démarche, prenons l'exemple suivant :

Soit deux maïs : l'un conduit en satisfaction des besoins, produit 85 q de grains secs, l'autre conduit en période critique produit 79 q. Les deux sont assurés de bénéficier d'une disponibilité pédo-climatique de 350 mm. Système d'irrigation choisi : pompage individuel en lac collinaire avec quadrillage total.

A. — *Calculs des marges brutes pour les deux types d'irrigation*

- *Irrigation satisfaction des besoins.*

Les besoins sont de 520 mm, la disponibilité de 350 mm, les apports seront donc de 170 mm correspondants à 1 509 F/ha (SUAD Haute-Garonne, Marty et Hilaire, 1979).

En retirant de la marge brute théorique calculée pour 85 q (équation (5) et fig. 3) les 1 509 F du coût de l'irrigation, on obtient une marge brute réelle de

$$5\,115\text{ F} - 1\,509\text{ F} = \mathbf{3\,606\text{ F}}.$$

- *Irrigation période critique.*

Compte tenu des besoins (450 mm) et de la disponibilité (350 mm), les apports seront de 100 mm pour un coût de 1 300 F. La marge brute réelle sera :

$$4\,386\text{ F} - 1\,300\text{ F} = \mathbf{3\,086\text{ F}}.$$

On constate dans le cas de l'irrigation satisfaction des besoins une marge brute supérieure à celle de l'irrigation période critique. Par conséquent, si aucune contrainte n'oblige l'exploitant à limiter ses apports, c'est bien entendu l'irrigation satisfaction des besoins qui procure la marge brute la plus importante.

Cependant, si pour certaines raisons, l'exploitant est amené à réduire ses apports, la rentabilité de l'eau apportée peut-être meilleure dans le cas de l'irrigation période critique.

B. — *Rentabilité de l'eau apportée pour les deux types d'irrigation*

Pour calculer la rentabilité de l'eau apportée, nous devons tenir compte du supplément de marge brute obtenu en fonction de la quantité d'eau apportée.

Dans notre exemple, la disponibilité pédo-climatique assure déjà une marge brute de 1 315 F (fig. 3). Dans le cas de l'irrigation satisfaction des besoins, la marge brute obtenue étant égale à 3 606 F, les 170 mm apportés procurent donc un supplément de marge brute de 3 606 F — 1 315 F = 2 291 F. La rentabilité du m^3 d'eau apporté est égale à 2 291 F/1 700 m^3 (170 mm) = **1,35 F/m^3.**

Dans le cas irrigation période critique, pour une consommation de 450 mm, la marge brute est de 3 086 F ; les 100 mm procurent donc un supplément de 3 086 F — 1 315 F = 1 771 F qui correspond à une rentabilité de **1,77 F/m^3.**

Les différences entre les résultats des deux types d'irrigation sont inversées selon que l'on considère la marge brute totale ou la rentabilité de l'eau apportée ; ceci n'est pas contradictoire, car l'irrigation période critique ne permet d'atteindre que des rendements inférieurs à ceux de l'irrigation satisfaction des besoins et, dans les conditions de notre exemple, la rentabilisation supérieure de l'eau apportée en période critique ne permet pas de couvrir l'augmentation des rendements obtenus en satisfaction des besoins.

C. — *Calculs des seuils de rentabilité*

Le seuil de rentabilité sera atteint à :

$$\frac{22{,}35\ (^1)}{1\,509} = \frac{1\ (^2)}{0{,}014\,8} = 67 \text{ mm d'apport}$$

pour l'irrigation satisfaction des besoins, autrement dit ce type d'irrigation, dans notre exemple, compte tenu de son coût n'est rentable que pour une disponibilité ne dépassant pas $520 - 67 = \mathbf{450\ mm}$. Dans le cas irrigation période critique, le seuil est atteint à :

$$\frac{28{,}05\ (^1)}{1\,300} = \frac{1\ (^2)}{0{,}021\,6} = 46 \text{ mm d'apport,}$$

ce qui fixe le niveau de disponibilité pour rentabiliser ce type d'irrigation à $450 - 46 = \mathbf{400\ mm}$.

Conclusions

Nous avons voulu mettre au point une méthodologie permettant d'aborder l'aspect économique de l'irrigation à partir de connaissances agronomiques.

Le maïs étant la plante qui répond le mieux à l'irrigation et sur laquelle nous possédons un maximum de données, nous l'avons choisi pour illustrer notre modèle. Toutefois, les rendements potentiels du maïs ou de toute autre plante, variant d'une région à l'autre, les résultats présentés ne sont évidemment valables que dans la région toulousaine et compte-tenu des conventions de calculs concernant les charges fixes et variables.

L'essentiel de la démarche a été de montrer, avant toute étude économique globale de l'irrigation au niveau d'un système de production, l'importance du processus de rentabilisation de l'eau par la plante en fonction de l'accroissement de la disponibilité. En effet, les conditions pédoclimatiques locales, l'insuffisance d'aménagement hydraulique régional peuvent amener l'exploitant à limiter ses apports d'eau.

D'où l'intérêt de connaître les cultures capables de mieux rentabiliser l'eau et, pour une même culture, de mesurer l'incidence économique d'un apport limité. Cela suppose l'utilisation de connaissances techniques : à partir du moment où l'on peut estimer de façon assez précise les réponses à l'eau, il devient possible pour des conditions de milieux donnés, de hiérarchiser la rentabilité de l'irrigation et d'établir des modèles de réponses économiques pour diverses cultures.

---

(1) Selon droites de réponses économiques (fig. 3).
(2) Voir explications de la figure 4.

Nous pourrons alors envisager d'intégrer les résultats dans différents systèmes de cultures et apporter ainsi quelques éléments de réponse au problème général de la valorisation de l'eau.

Reçu pour publication en février 1980.

Summary

Technical and economic survey on the cost-effectiveness of a unit of irrigation water used for maize (in the Toulouse area)

Our purpose was to work out a model to evaluate cost-effectiveness of a unit of irrigation water used for plants in accordance with their behavioural response to water (Robelin, 1958 ; Maertens, 1973 ; Puech, 1974). We selected maize to illustrate this model.

According to an initial assumption, we assume that the water meeting maize requirements is free, this allowing, taking into account the amounts of water used according to two types of irrigation (irrigation tending to meeting requirements and irrigation during critical periods), to work out straight lines of the technical and economic responses (fig. 3), showing the significance of the highest gross margins achieved in terms of the increased availability of water.

In this way, the efficiency of a millimetre of water used during a critical period is instanced by maximum cost-effectiveness (28.05 FF/mm) higher than that achieved when fully meeting requirements (22.35 FF/mm). Yet, the maximum gross margin for meeting requirements remains higher than the maize's during the critical period (5 115 FF against 4 386 FF).

According to another assumption, irrigation costs are considered in accordance with three levels of natural-water availability not fully meeting maize requirements (tables 1, 2, 3). The maximum « free water » gross margins is all the less as costs are high, and hence the lower are the levels of availability of natural water (table 4).

The cost-effectiveness of irrigation decreases as costs rise, in accordance with the straight lines in the form of $y = -ax + b$ (fig. 5), although the greater the inflows the lesser are the regression coefficients.

A comparative study of both types of irrigation has worked out the cost effectiveness of one millimeter of irrigation water, the additional gross margins in terms of inflow (fig. 7), and the limiting value of irrigation during critical periods in accordance with natural water availability and irrigation costs (fig. 8).

Zusammenfassung

Technische und wirtschaftliche untersuchung der valorisierung der bewässerung des mais (bezirk Toulouse)

Ausgehend vom Verhalten der Pflanzen gegenüber deren Ansprechen auf Wasser (Robelin, 1958 ; Maertens, 1973 ; Puech, 1974) haben wir versucht den Valorisierungsvorgang des Wassers durch die Pflanzen darzustellen und haben dafür den Mais als darstellendes Beispiel ausgewählt.

In einer ersten Voraussetzung ist das dem Mais nötige Wasser als kostenlos betrachtet. Bezugnehmend auf die verbrauchten Wassermengen nach je zwei angewandten Bewässerungsarten (den Bedürfnissen des Mais entsprechende Bewässerung oder Bewässerung in kritischer Periode) konnten wir hierdurch wirtschaftlichtechnische Ansprechgerade bestimmen (bild 5), welche die Grösse der erzielten maximalen Bruttospannen in Abhängigkeit der Zunahme der Wasserverfügbarkeit ausdrücken.

Die Rentabilität des Millimeters in kritischer Periode verbrauchten Wassers wird durch eine grössere maximale Rentabilität (28,05 F/mm) gegenüber derjenigen den Bedürfnissen vollentsprechenden von (22, 35 F/mm) ausgedrückt ; währenddessen bleibt die maximale Bruttospanne, bei den Bedürfnissen entsprechender Versorgung, höher als jene des Mais bei Versorgung in kritischer Periode (5 115,– gegen 4 386,– F).

In einer zweiten Voraussetzung werden die Bewässerungskosten in drei Stufen der natürlichen Wasserverfügbarkeit, niedriger als die Bedürfnisse des Mais, berücksichtigt (tabelle 1, 2, 3). Die maximalen Bruttospannen « kostenloses Wasser » werden umsomehr verringert, je mehr die Kosten steigen, somit mit geringeren natürlichen Wasserverfügbarkeitsstufen (tabelle 4).

Nach Geraden der Form $y = -ax + b$ (bild 5), jedoch mit je kleineren Regressionskoeffizienten je grösser das Angebot ist, verringert sich die Rentabilität der Bewässerung je mehr die Kosten steigen

Die Vergleichsuntersuchung der zwei Bewässerungsarten (den Bedürfnissen vollentsprechende oder in kritischer Periode) erlaubt die Rentabilität des Millimeters, von der Vewässerung herkommenden Wassers, hervorzuheben und die Ergänzungen der Bruttospannen in Abhängigkeit der Angebote (bild 7) sowie die Grenzen des Bewässerungsvorteils in kritischer Periode, je nach der natürlichen Wasserverfügbarkeit und den Vewässerungskosten zu bestimmen (bild 8).

Références bibliographiques

ATTONATY J.-M., 1969. *Aspects économiques de l'irrigation en grande culture dans les régions subhumides.* Laboratoire d'Economie Rurale I.N.R.A. Grignon, 44 p.

Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Cascogne, 1976 : *Revue d'information de la C.A.C.G.*, 37 ; L'irrigation du maïs en France, 26-33.

CORDONNIER P., 1976. *Aspects économiques relatifs à la rentabilité de l'irrigation du maïs.* Laboratoire d'Economie Rurale I.N.R.A. Grignon, 14 p.

De NAUROIS H., 1973. *Sur certains aspects relatifs à la satisfaction des besoins en eau de quelques cultures. Répercussions sur les modalités d'irrigation.* Rapport de stage E.S.A.P., Toulouse.

Institut National de Gestion et d'Economie Rurale. Bureau Commun du Machinisme et de l'Equipement Agricole, 1979 (I.G.E.R.-B.C.M.E.A.) : Etude technico-économique. *Irrigation par aspersion*, 116 pages.

MAERTENS C., CABELGUENNE M., 1979. Caractérisation des pouvoirs d'extractions de l'eau du sol de quelques plantes de grande culture (à paraître).

MARTY J.-R., PUECH J., MAERTENS C., BLANCHET R., 1975. Etude expérimentale de la réponse de quelques grandes cultures à l'irrigation. *C. R. Acad. Agric.*, 560-570.

MARTY J.-R., HILAIRE A., 1979. Quelques aspects actuels de la valorisation de l'irrigation par les grandes cultures dans le Sud-Ouest de la France. *C. R. Acad. Agric.*, 208-218.

PUECH J., MAERTENS C., 1974. Efficience de l'eau consommée de quelques cultures placées dans différentes conditions écologiques. *Agrochimica*, **XVIII**, 3, 223-230.

PUECH J., MARTY J.-R., MAERTENS C., 1976. Efficience de l'eau consommée par divers végétaux et application à la valorisation de l'irrigation. *Bull. Techn. Inform.*, **306.**

ROBELIN M., COLLIER D., 1958. Evapotranspiration et rendements culturaux. *C. R. Acad. Sci.*, **247,** 1774-1776.

ROBELIN M., MINGEAU M., 1970. Alimentation en eau et croissance de la betterave. *Rev. Intern. Inst. Rech. Bett.*, 71-86.

Station d'Agronomie de Toulouse : *Plante, Sol, Climat et Irrigation.* Etudes réalisées en 1965-1966-1967.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : B. HURPIN

Imprimerie Jouve, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 8-1980

Dépôt légal : 3e trimestre 1980. N° d'Impression : 27261

CPPAP n° 1426-ADEP

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1980	France Prix T.T.C.	Étranger Prix net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix net
ANNALES AGRONOMIQUES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
APIDOLOGIE, 4 nos par an	100 F	175 F (sauf RFA)	30 F	50 F (sauf RFA)
* ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE				
** ANNALES DE ZOOLOGIE, ÉCOLOGIE ANIMALE				

* Les Annales de Biologie animale, Biochimie Biophysique deviennent : « Reproduction, Nutrition, Développement ».
** Les Annales de Zoologie, Ecologie animale cessent avec le n° 4, volume 11, 1979.
Les articles publiés dans cette série paraîtront désormais dans les *Œcologia, Applicata* de la revue : *Acta Œcologia*.
Pour ces 2 revues s'adresser à C.D.R. Gauthier-Villars, BP 119, 93104 MONTREUIL CEDEX. Tél. (1) 374.12.45.

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Utilisation par les ruminants des pâturages d'altitude et parcours méditerranéens. Xes Journées du Grenier de Theix.
576 p., 1979 ..... **110,00 F**

La Forêt et la Ville. Essai sur la forêt dans l'environnement urbain et industriel.
252 p., 1979 ..... **50,00 F**

Alimentation des ruminants. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants. Besoins alimentaires des animaux et valeur nutritive des aliments.
600 p., 1978 ..... **140,00 F**

Introduction à la statistique en biologie par **S. C. Pearce,** traduction de **J. P. Doazan.**
260 p., 1978 ..... **25,00 F**

L'I.N.R.A., l'eau et la production agricole
270 p., 1978 ..... **50,00 F**

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne. Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud par le Groupe de Recherches I.N.R.A.-E.N.S. S.A.A.
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France, faunistique et biologie, par **H. Le Louarn** et **M. C. Saint Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

La Vache laitière. IXes Journées du Grenier de Theix.
342 p., 1977 ..... **60,00 F**

Amélioration génétique des animaux de ferme. Application aux bovins (sous la Direction de **B. Vissac**).
160 p., 1977 ..... **35,00 F**

Carte pédologique de la France à 1/1.000.000 par **J. Dupuis** ..... **96,00 F**

Cartes pédologiques de France à 1/100.000 ..... **96,00 F** (chacune)
(Vichy, Perpignan, Angoulême, Brives, Dijon, Toulon, Moulins, Condom, Tonnerre, Privas, St-Dié, Lesparre).

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français par **R. Cousin.**
111 p., et 140 fiches, 1974 ..... **168,50 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Auge, P. Allemand, R. Hames.**
144 p., 1973 ..... **63,50 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut National de la Recherche Agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1980, **31** (3), 239-336.

Table des matières

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique* Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. III. — Caractéristiques générales de l'adsorption des pesticides 239

Huguette BESSON, Simonne CAILLÈRE, S. HÉNIN. — Comportement des ions Al et Fe en présence de silice et de cations divalents..... 259

G. LASCÈVE, P. COUCHAT. — Le transfert de l'eau dans la plante en régime transitoire..... 273

J. C. RODE, O. BETHENOD. — Influence de la carence hydrique sur le comportement photosynthétique du Lin 285

Éliane MORÉ, M. COPPENET. — Teneurs en sélénium des plantes fourragères. Influence de la fertilisation et des apports de sélénite..... 297

M. CABELGUENNE. — Étude technique et économique de la valorisation de l'irrigation du Maïs (région Toulousaine)..... 319

Contents

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographic review.* Adsorption of pesticides by soils and their constituents. III. — General characteristics of the pesticides adsorption..... 239

Huguette BESSON, Simonne CAILLÈRE, S. HÉNIN. — Behaviour of Al and Fe ions in presence of silica and divalent ions 259

G. LASCÈVE, Ph. COUCHAT. — Water transfer in plant..... 273

J. C. RODE, O. BETHENOD. — Photosynthetic activity after a period of water shortage in Flax. 285

Éliane MORÉ, M. COPPENET. — Selenium contents of forage plants. Effects of fertilization and selenite applications..... 297

M. CABELGUENNE. — Technical and economic survey on the cost-effectiveness of a unit of irrigation water used for maize (in the Toulouse area) 319

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 10-036-001-5.

annales agronomiques

Trimestriel

1980

Vol. 31. N° 4

inra

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron. ANAGA9 31 (4) 337-494 (1980)

FR ISSN 0003-3839.

AAG
31.4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Président-Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., Paris Cedex 75231

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur de la Station de Biochimie et Physico-Chimie des céréales et de leurs dérivés C. E. R. D. I. A., le Noyer Lambert, 91300 Massy.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— F. GROSCLAUDE, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z.. 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— J. ASSO, Station de Virologie, Immunologie, Route de Thiverval, 78850 Thiverval-Grignon.

Reproduction, Nutrition, Développement. Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : C. N. R. Z. 78350 Jouy-en-Josas.

— Ch. THIBAULT.
— L. GUÉGUEN.
— G. PÉTRISSANT.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES. Tél. (3) 950-75-22

annales agronomiques

Trimestriel

1980

Vol. 31. N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1980, **31** (4), 337-362.

Essai de bilan isoquartz sur un planosol du Bassin de Paris Méthode et résultats

D. BAIZE

Service d'Etude des Sols
et de la Carte Pédologique de France,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Le planosol acide étudié est développé sur une roche sédimentaire très particulière du Crétacé inférieur : les « sables verts » glauconieux. Il a été sélectionné parmi d'autres parce que minéralogiquement plus simple. Son homogénéité originelle a été également vérifiée.

L'objectif était de réaliser un bilan isoquartz. Pour cela, des méthodes et des raisonnements très divers ont été mis en œuvre afin d'aboutir à une reconstitution minéralogique aussi précise que possible.

Le recoupement relativement satisfaisant des divers résultats, notamment ceux concernant le quartz, a permis de fonder le bilan sur des valeurs suffisamment sûres. Le bilan isoquartz fait apparaître trois faits essentiels :

1) On constate une perte de poids de 27 p. 100 sur les 75 premiers cm du profil, et de 40 p. 100 en ce qui concerne les horizons de surface appauvris.

2) Des pertes de matières très importantes sont mesurées dans les horizons A, que ne compense absolument pas une petite accumulation enregistrée à la partie supérieure des horizons (B). *Ces pertes ont donc été évacuées latéralement hors du profil.*

3) La composition chimique des pertes des horizons A correspond remarquablement bien à celle de la fraction phylliteuse du profil (fraction inférieure à 2 μm et glauconie en grains). Il semble possible d'en déduire que l'appauvrissement des horizons A correspond *soit à un entraînement en suspension des particules, soit à une destruction des minéraux argileux avec évacuation totale des résidus.*

Ce bilan vient confirmer ce qui avait été avancé antérieurement : les horizons argileux doivent être considérés essentiellement comme des horizons (B) d'altération. Ce type, de profil E/(B) ne trouve actuellement pas de place dans la classification française, ni dans la Soil Taxonomy.

Introduction

Des sols à forte différenciation texturale et à morphologie de planosols ont été décrits en Champagne humide, développés dans divers matériaux du Crétacé inférieur (Baize, 1974-1977).

Ils correspondent bien à la définition des planosols donnée par Dudal (1972) mais il ne s'agit ni de planosols « lithomorphes » développés dans un matériau hétérogène comme ceux décrits par Favrot et Legros (1972) ni de planosols secondaires résultant de l'évolution ultime de sols lessivés (Begon et Jamagne, 1972). En

effet, les argilanes d'illuviation font pratiquement défaut dans les horizons argileux qui doivent, au moins sur le plan morphologique, être plutôt considérés comme des horizons (B) d'altération.

Leur genèse semble donc résulter d'un processus particulier d'évolution qui ne serait pas à mettre en relation avec un type de climat déterminé, mais serait plutôt lié à l'intervention conjuguée de deux facteurs : existence de roches-mères argileuses, d'origine sédimentaire, et topographie relativement plane.

L'appauvrissement superficiel en argile est évident, mais son ampleur n'a jamais été évaluée. En outre, son mécanisme n'est pas connu. On ignore notamment si les matières entraînées hors des horizons A migrent *verticalement* ou *latéralement*, *sous forme de suspensions ou de solutions*.

C'est pour essayer de répondre à ces questions qu'un bilan isoquartz a été tenté sur un profil sélectionné, parmi beaucoup d'autres, parce que minéralogiquement plus simple.

Un des objectifs de ce travail était donc de cerner avec le maximum de sécurité les teneurs en quartz des principaux horizons. C'est pourquoi nous avons cherché à les évaluer en utilisant différentes voies de calcul indépendantes les unes des autres, de manière à pouvoir asseoir une quasi-certitude sur la concordance de plusieurs résultats convergents.

I. — Présentation du profil

Localisation : Feuille I.G.N. Chablis 1-2, « les plants d'Héry » à 10 km au nord-est d'Auxerre.

Région naturelle : Champagne humide, région d'affleurement des sédiments argileux et sableux du Crétacé inférieur.

Climat : Océanique ; température moyenne annuelle + 10° 7 avec + 2° 5 en janvier et + 18° 6 en juillet ; précipitations moyennes annuelles de 630 à 680 mm pour 163 jours de pluie (Auxerre).

Altitude : 136 m.

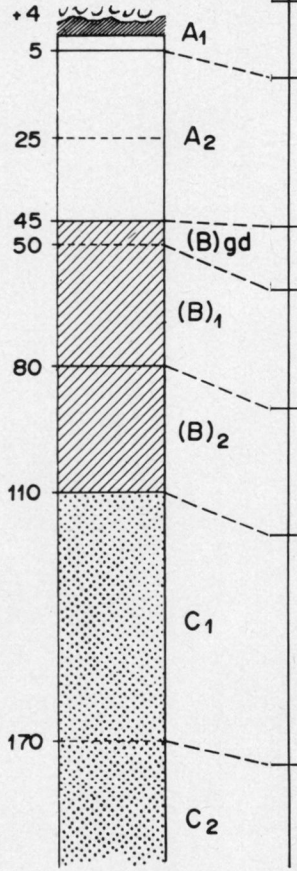
Position géomorphologique et topographique : Longue surface structurale de 5 km à pente générale de 1,4 p. 100 en moyenne, parallèle au pendage des couches (vers le nord-ouest), recreusée par de petits talwegs ; haut de versant ; pente maximum locale 3 p. 100.

Végétation : Futaie et taillis de chênes et bouleaux ; espèces acidiphiles (bourdaine, canche flexueuse, germandrée, chevrefeuille) et hygrophiles (molinie).

Matériau géologique : « sables verts » glauconieux de l'Albien inférieur.

Comportement hydrique : nappes « hypodermiques » temporaires, engorgements superficiels momentanés de novembre à mai.

Morphologie du profil : figure 1.



	Couleur	Structure	Texture	Divers
A_1	Gris-violacé 7,5 YR 3/2	Particulaire	Sableuse fine	
A_2	Brun-jaunâtre 2,5 Y 6/4 à taches rouille 7,5 YR 4/4	Polyédrique émoussée faiblement développée	Sableuse fine	Gros cailloux de grès ferrugineux émoussés Taches rouille plus nombreuses vers le bas
(B)gd	Vert foncé à nombreuses taches rouille 5 YR 4/4	Cubique	Argilo-sableuse	Zones blanchies, sableuses, à la surface des agrégats
$(B)_1$	Vert foncé à taches brun-rouille 7,5 YR 4/4	Prismatique à sous-structure prismatique plus fine voire cubique	Argilo-sableuse	Quelques revêtements vert-noir-foncé sur faces verticales et supérieures des agrégats prismatiques
$(B)_2$	Vert à taches brun-rouille 7,5 YR 5/6	Prismatique grossière bien développée	Argilo-sableuse	Faces luisantes et slickensides
C_1	Vert-jaune	Massif	Argilo-sableuse à sablo-argileuse	
C_2		Massif	Sablo-argileuse	

FIG. 1. — *Morphologie du profil*

Profile Morphology

TABLEAU 1

Données analytiques
Analytical data

Profondeur en cm	Horizon	Granulométrie en p. 100 de la terre fine							Matière organique p. 100	Carbone p. 100	C/N	pH H_2O	Fer total p. 100 HF	Fer Deb p. 100	Fer Deb / Fer total	Indice de différenciation texturale
		Argile 0-2 µm	Limon fin 2-20 µm	Limon gros. 20-50 µm	Sable fin 50-100 µm	Sable fin 100-200 µm	Sable gros. 200-500 µm	Sable gros. 500-2 000 µm								
0-5	A_1	14,1	15,8	11,7	29,5	22,7	5,5	0,7	10,80	6,28	14,8	3,9	1,46	0,84	0,58	—
10-20	$A_{21}g$	11,0	13,3	11,2	33,3	23,9	6,6	0,7	3,03	1,76	18,0	4,3	1,46	0,84	0,58	1,0
25-40	$A_{22}g$	12,1	12,4	11,4	32,6	24,7	6,0	0,8	1,04	0,61		4,4	1,97	1.10	0,56	1,1
43-48	(B) gd	46,4	9,4	6,6	22,5	12,9	1,8	0,4	0,90	0,53		4,5	7,23	3,00	0,41	4,22
60-75	$(B)_1$	47,9	6.6	6.7	25,5	12,3	1,0	0,0	0,50	0,29		4,6	7,29	2,34	0,32	4,35
90-110	$(B)_2$	33,4	7,2	6,7	38,7	13,3	0,6	0,1	0,25	0,15		4,7	6,33	1,50	0,24	3,04
140-155	C_1	23,7	6,8	6,7	33,0	26,7	1,0	0,1	0,14	0,08		4,9	6,67	1,15	0,17	2,15
180-190	C_2	20,8	5,5	3,9	7,9	27,8	33,8	0,3	0,10	0,06		5,4	5,13	1,02	0,20	1,89
350-370	C_4	9,3	5,1	2,3	2,1	5,0	58,1	18,1	0,08	0,05		7,6	2,98	0,38	0,13	—
Partie dégradée de (B) gd									0,81	0,47		4,2	2,99	1,17	0,39	—

Profondeur en cm		Complexe absorbant milliéquivalents/100 g										Capac. d'éch. argile	Aluminium p. 100		
		T	Ca^{++}	Mg^{++}	K^+	Na^+	S	S/T p. 100	Al^{+++}	(S + Al)/T p. 100	H^+ p. 100		Total HF	TAMM	TAMM / HF
0-5	A_1	18,1	3,90	1,47	0,47	0,04	5,88	32	1,6	41	59	—	1,50	0,16	0,11
10-20	$A_{21}g$	6,6	0,30	0,27	0,16	0,02	0,75	11	3,2	60	40	—	1,50	0,15	0,10
25-40	$A_{22}g$	5,4	0,30	0,30	0,12	0,02	0,74	14	2,8	66	34	27	1,70	0,20	0,12
43-48	(B) gd												4,50	0,55	0,12
60-75	$(B)_1$	23,0	4,80	1,99	0,76	0,29	7,84	34	15,0	99	1	46	5,10	0,56	0,11
90-110	$(B)_2$	19,2	6,30	2,17	0,56	0,39	9,42	49	8,9	95	5	56	4,40	0,42	0,10
140-155	C_1	16,2	7,70	2,27	0,46	0,40	10,83	67	4,9	97	3	67	3,70	0,34	0,09
180-190	C_2	13,2	7,50	1,93	0,36	0,39	10,18	77	1,7	90	10	63	3,30	0,28	0,08
350-370	C_4														
Partie dégradée de (B) gd													2,40	0,26	0,11

Données analytiques : tableau 1.

Classification : Inclassable selon la classification française C.P.C.S. 1967 ; F.A.O. : planosol dystrique ; proposition : planosol d'altération directe à pseudogley primaire (Baize, 1977).

II. — Approche qualitative

Des renseignements minéralogiques qualitatifs et grossièrement quantitatifs ont été obtenus par différentes méthodes :

— examen micromorphologique de lames minces (MM) ;

— examen à la loupe binoculaire des fractions > 20 µm (LB) ;

— diffraction des rayons X sur les fractions < 2 µm et 2-50 µm (RX) ;

— analyses thermique différencielle et thermo-pondérale des diverses fractions granulométriques (ATP-ATD) ;

— détermination et comptage des « minéraux lourds » et des « minéraux légers » après coloration des feldspaths au rhodizonate de potassium (ML).

L'horizon C_2 apparaît nettement différent des autres par la taille plus grossière de son « squelette » quartzeux (MM), ce qui nous conduira à l'exclure comme horizon C de référence.

La glauconie en grains est pratiquement absente des horizons A. Il n'en subsiste que de rares grains très altérés (couleur jaune) dans la fraction SF_1 (50 à 100 µm) (MM, LB, ML).

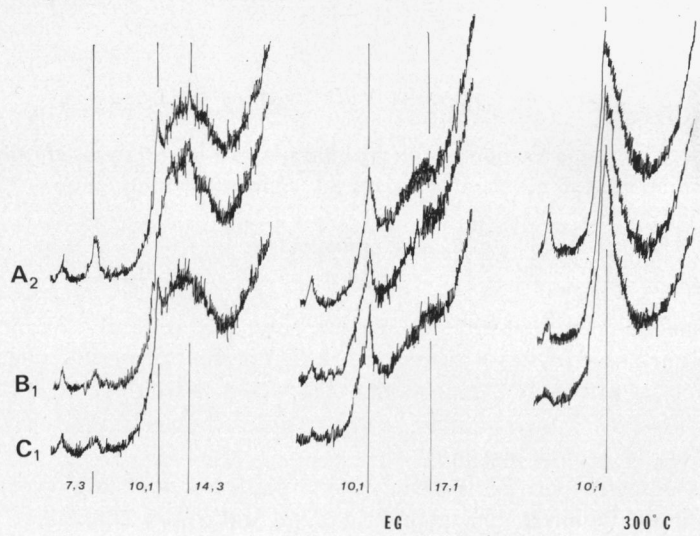


FIG. 2. — *Diffractogrammes de rayons X.* Argiles-Mg. De gauche à droite : sans traitement ; traitement à l'éthylène-glycol ; chauffage à 300 °C.

X-ray diagram. Mg-clay. From left to right : without any treatment ; treatment with glycol-ethylen ; after heating at 300 °C.

Les feldspaths, peu abondants, sont surtout représentés par l'orthose.

Une très grande parenté a été reconnue quant aux cortèges de minéraux lourds des horizons A et (B). Seuls sont présents en quantité notable les opaques (plus de

75 p. 100 de l'ensemble), la tourmaline, le rutile, le zircon, la staurotide. La somme des minéraux lourds n'excède pas 0,3 p. 100 pondéral de la terre fine totale.

La muscovite s'avère fort rare et pourra donc être négligée (MM, LB, ML).

La nature des minéraux argileux est pratiquement identique dans tous les horizons, savoir (fig. 2) :

— traces de kaolinite, surtout nettes dans les horizons A ;

— glauconite abondante ;

— interstratifiés 10-14 Å gonflant à l'éthylène-glycol et fermant à 10 Å par chauffage à 300 °C (RX).

La présence notable de kaolinite et d'oxydes cristallisés est également exclue par les diagrammes d'ATD.

Première conclusion qualitative

Pour l'étude ce de profil, nous bénéficions de deux circonstances particulièrement favorables :

— en ce qui concerne la fraction $< 2\ \mu m$, on a affaire presque exclusivement à de la glauconite et à ses produits de transformation, la kaolinite s'avérant absente ou négligeable ;

— dans les fractions limons et sables, outre la glauconie en grains, il n'y a que du quartz en très grande quantité et une faible proportion de feldspaths potassiques.

On peut donc conclure, avec une approximation suffisante, que le matériau originel = quartz + glauconite.

III. — Approche quantitative de base

Elle repose sur trois éléments : les granulométries, les analyses chimiques totales et la composition de cinq glauconies isolées par séparation magnétique.

1. — *Granulométries*

a) *Aspect général.*

Les granulométries sont difficiles à interpréter par suite de l'abondance de la glauconie en grains dans les horizons (B) et C. En effet, à mesure que l'on monte dans le solum, les grains de glauconie ont tendance à se fragmenter et à se détruire pour fournir :

— de l'argile granulométrique,

— des fragments plus petits et de solidité douteuse dont le devenir durant les manipulations de l'analyse granulométrique est difficile à connaître.

Le « ventre » d'argile, très net sur la figure 3 pourrait correspondre à une illuviation au sein du solum ou bien résulter de la conjonction de deux phénomènes :

— argilisation des grains de glauconie par altération,

— appauvrissement en argile des horizons supérieurs.

En tout cas, le contact planique est nettement tranché avec passage de 12 à 46 p. 100 d'argile en moins de 5 cm.

Rappelons que l'un des objectifs du bilan isoquartz envisagé est de déterminer avec certitude si les matières qui semblent avoir été perdues par les 45 premiers cm

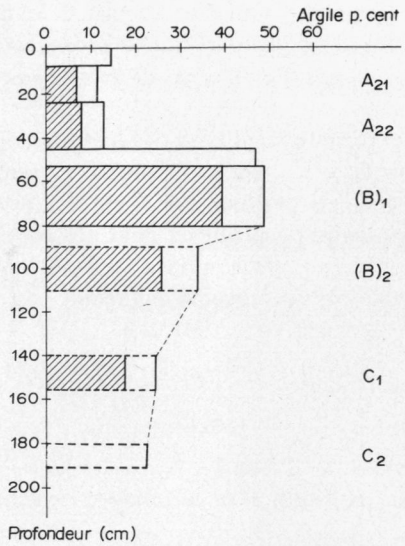


FIG. 3. — *Granulométrie.* Teneurs en argile en fonction de la profondeur (en hachurés figurent les argiles fines < 0,2 µm lorsqu'elles ont pu être déterminées).

Clay contents as a function of depth (fine clays < 0,2 µm are pictured by hatches when they have been measured).

du profil ont été évacuées hors du solum ou si, au contraire, elles se sont accumulées dans les horizons B sous une forme peu reconnaissable (horizon Bt « dynamique », Fedoroff, 1968).

b) « *Squelettes granulométriques* ».

La comparaison des « squelettes granulométriques » des divers horizons sert à

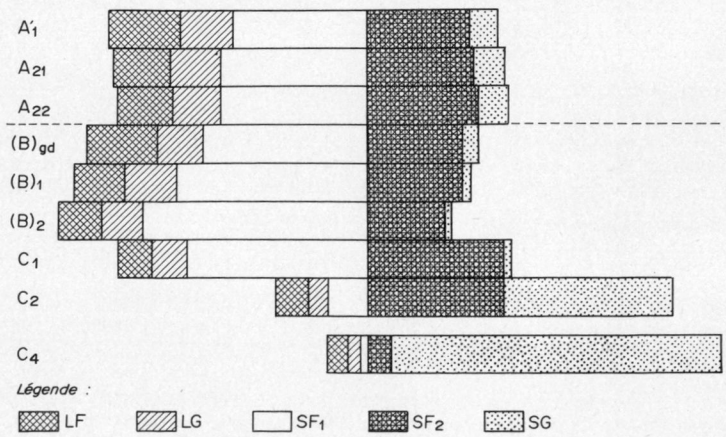


FIG. 4. — « *Squelettes granulométriques* ».

« *Granulometric skeletons* ».

vérifier l'homogénéité initiale du matériau soumis à la pédogénèse (Baize, 1974). Mais le raisonnement est rendu difficile ici par la présence dans les horizons (B) et C de grains de glauconie en cours d'altération alors que ceux-ci sont absents dans les horizons A.

Sur la figure 4 on constate la similitude des horizons A et le caractère beaucoup plus grossier des horizons C_2 et C_4. Les horizons (B) ne semblent pas nettement différents entre eux, ni très distincts de l'horizon C_1 et des horizons A. Cependant, une parfaite homogénéité originelle du profil ne peut pas être prouvée avant une étude plus poussée et notamment avant des comparaisons portant seulement sur le « squelette granulométrique » *quartzeux* présumé invariant car supposé inaltérable.

2. — *Analyses chimiques totales* (tabl. 2)

TABLEAU 2

Analyses chimiques totales (en p. 100) *des horizons et des fractions granulométriques*
Chemical analysis (as p. 100) *of the horizons and the different size-fractions*

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	CaO	TiO_2
Horizon total								
A_{22}	88,30	3,10	3,96	0,95	0,25	0,12	0,07	0,58
$(B)_1$	66,96	9,32	10,68	2,41	1,22	0,06	0,13	0,40
$(B)_2$	71,92	7,75	9,25	2,64	1,13	0,07	0,23	0,41
C_1	73,55	6,80	9,77	2,63	1,23	0,05	0,27	0,31
Fractions < 2 µm								
A_{22}	49,05	13,43	16,14	3,61	2,26	0,22	0,25	1,05
$(B)_1$	46,97	14,06	17,56	4,22	2,86	0,09	0,11	0,40
$(B)_2$	47,31	14,78	15,91	4,31	2,86	0,11	0,19	0,38
C_1	47,41	14,23	15,77	4,90	2,90	0,09	0,10	0,38
Limons fins (2-20 µm)								
A_{22}	88,21	5,29	2,47	1,63	0,22	0,44	0,41	1,28
$(B)_1$	65,58	10,21	10,94	4,01	1,23	0,24	0,48	0,80
$(B)_2$	62,56	10,96	12,00	4,63	1,38	0,22	0,49	0,73
C_1	59,42	11,34	12,24	5,06	1,43	0,18	0,55	0,70
Limons grossiers (20-50 µm)								
A_{22}	93,13	3,02	1,23	1,16	0,12	0,35	0,39	0,67
$(B)_1$	62,46	7,75	11,27	3,98	1,29	0,12	0,46	0,30
$(B)_2$	59,93	9,26	13,38	4,72	1,59	0,08	0,50	0,35
C_1	58,50	9,60	15,30	5,42	1,72	0,03	0,60	0,30
Sables fins 1 (50-100 µm)								
A_{22}	98,72	0,76	0,37	0,31	0,05	0,03	0,27	0,55
$(B)_1$	92,87	2,27	2,79	1,05	0,33	0,04	0,31	0,27
$(B)_2$	86,09	2,83	3,53	1,36	0,43	0,07	0,32	0,62
C_1	78,90	4,54	6,25	2,31	0,80	0,08	0,48	0,45
Sables fins 2 (100-200 µm)								
A_{22}	97,62	0,57	0,46	0,20	0,05	0,01	0,28	0,18
$(B)_1$	95,44	1,13	1,40	0,51	0,17	0,03	0,24	0,07
$(B)_2$	90,07	3,02	4,50	1,51	0,53	0,07	0,35	0,08
C_1	81,49	4,35	6,98	2,41	0,85	0,07	0,41	0,08

Elles ont été effectuées sur les principaux horizons pris globalement et sur les diverses fractions granulométriques de chaque horizon.

Elles concernent huit éléments qui ont toujours été exprimés en *oxydes* (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O, MgO, Na_2O, CaO, TiO_2) et en p. 100 de l'échantillon *avant* calcination à 1 100 °C (1).

Les analyses ont été réalisées au laboratoire I.N.R.A. d'Arras après mise en solution par HF, à l'exception de Si et Ti qui ont été dosés par fluorescence X sur solution solide.

On remarquera que Na_2O, CaO et TiO_2 représentent toujours des valeurs très faibles. Les comparaisons d'un horizon à l'autre semblent très délicates en raison de fortes erreurs relatives probables.

Le simple examen du tableau 2, permet deux constatations majeures.

D'une part, les fractions $< 2\ \mu m$ des quatre horizons sont de *compositions très voisines*, très riches en fer et contenant du potassium et du magnésium en proportion notable. Nous avons là une confirmation de l'approche par les rayons X. Il s'agit certainement de *glauconite* et des produits de transformation de ce minéral.

D'autre part, dans les fractions limons et sables, il suffit de considérer les variations des teneurs en Al, Fe et Mg pour suivre parfaitement la destruction des grains de glauconie à mesure que l'on monte dans le profil depuis l'horizon C jusqu'au A, le quartz s'accumulant corrélativement.

3. — *Composition des glauconies* (tabl. 3)

La glauconie en grains a pu être isolée par séparation magnétique parmi cinq fractions granulométriques. Alors que les grains issus des horizons $(B)_2$ et C_1 se présentent avec leur couleur habituelle vert-épinard foncé, ceux isolés à partir des sables fins de l'horizon $(B)_1$ montrent une teinte beaucoup plus ocre, indice d'une altération déjà importante.

TABLEAU 3

Composition chimique de cinq glauconites isolées par séparation magnétique
Chemical composition of five glauconites isolated with magnetic separator

		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	CaO	TiO_2	Perte au feu
Horizon $(B)_1$	50-100 μm	52,72	11,34	15,63	4,41	1,77	0,09	0,85	0,75	12,9
Horizon $(B)_2$	50-100 μm.....	47,65	11,15	19,52	6,24	2,40	0,18	0,38	0,80	11,8
Horizon C_1	20-50 μm.....	52,44	10,20	17,30	5,96	2,24	0,13	0,53	0,28	10,5
	50-100 μm.....	47,37	11,34	19,54	6,18	2,44	0,07	0,88	0,37	12,8
	100-200 μm....	49,90	10,40	19,40	5,75	2,70	0,14	0,80	0,13	11,6

(1) Le fer ferreux n'a pas pu être dosé. On notera toutefois que Douillet et Odin (1968) ont trouvé des valeurs de 1,10 à 3,25 p. 100 de FeO dans neuf glauconies crétacées ou tertiaires du Bassin de Paris.

Les résultats analytiques du tableau 3 montrent de façon claire que la glauconite s'altère notablement — alors qu'elle est encore agglomérée en grains — au fur et à mesure que l'on se rapproche de la surface du sol et que les grains sont plus petits. Les pertes affectent principalement le fer, le potassium et le magnésium. Ce fait constituera un écueil lors des reconstitutions minéralogiques puisque la glauconite n'a pas de composition chimique vraiment constante dès lors qu'elle a commencé à s'altérer.

Par contre, celle qui est extraite des sables fins (100-200 μm) de l'horizon C_1 peut être considérée comme « intacte ». Sa formule structurale, avec pour base onze oxygènes, est la suivante :

$$[Si_{3,69}Al_{0,31}]\ (Al_{0,59}Fe_{1,08}Mg_{0,3})\ O_{11}Ca_{0,06}Na_{0,02}K_{0,54}\ .$$

Elle est très voisine de celles données dans la littérature pour ce minéral (Weaver et Pollard, 1973 ; Douillet et Odin, 1968).

IV. — Déterminations du quartz

1. — *Reconstitutions minéralogiques par voie chimique. Difficultés de cette approche*

Il faut évaluer, à partir des p. 100 d'oxydes, les teneurs en quartz, glauconite, orthose... contenues dans les fractions $> 2\ \mu$m et exprimées en p. 100 de la terre fine totale (TFT) avec la relation :

$$\text{Limons} + \text{sables} = \text{horizon total} - \text{fraction} < 2\ \mu\text{m}\ .$$

Qu'il s'agisse de procéder à cette reconstitution directement sur les analyses de l'horizon total ou sur la somme pondérée de celles des fractions granulométriques, les principes sont les mêmes. Dans les limons et les sables il existe des minéraux de composition bien connue : quartz, orthose, glauconite... Mais il existe aussi des constituants plus difficiles à appréhender :

— d'une part la *glauconite altérée*, plus ou moins appauvrie en fer, magnésium et potassium et donc de composition variable. Ne pouvant apprécier convenablement ces produits d'altération, nous raisonnerons désormais par rapport à la glauconite en grains, très peu altérée et de composition connue (p. 345) ;

— d'autre part des minéraux argileux qui se situent dans la fraction des limons fins et dont la composition est inconnue. Nous ne tiendrons pas compte de ces minéraux, car notre sol est pauvre en limons et l'erreur ainsi commise demeurera minime.

Une fois déduit ce qui correspond à la fraction $< 2\ \mu$m on peut accéder à la teneur en glauconite soit à partir de Fe_2O_3, soit de MgO, puisque ces deux oxydes ne peuvent être imputés ni à l'orthose ni au quartz.

Si l'on utilise le fer, trois difficultés apparaissent. D'abord, cet élément semble pouvoir quitter facilement le réseau de la glauconite, même peu altérée ; c'est donc en principe un mauvais élément de référence. Ensuite, il est nécessaire de faire une correction pour les « oxydes » et les « amorphes » ferrifères qui peuvent exister dans l'horizon, d'où une nouvelle source d'erreurs. Enfin, il existe aussi peut-être des minéraux ferrifères cristallisés, si bien que la totalité du fer des limons et des sables ne serait pas à imputer seulement à la glauconite. En revanche, le fer présente l'avantage d'avoir des teneurs élevées pour lesquelles les erreurs relatives sont certainement assez faibles.

Le raisonnement à partir des teneurs en magnésium présente, de son côté, deux difficultés spécifiques. Ces valeurs étant faibles, les erreurs relatives peuvent être importantes. En outre, l'analyse de la fraction $< 2\ \mu m$ correspond à des argiles rendues magnésiennes. La correction indispensable a été faite mais sans connaissance précise de la véritable capacité d'échange de l'argile. Il y a là une cause importante d'inexactitude dans les calculs.

Une fois retranchés les x p. 10 de glauconite de composition connue, il demeure un faible résidu où K_2O est affecté à l'orthose et où TiO_2 est considéré arbitrairement comme du rutile.

Après déduction de l'orthose, le résidu de SiO_2 est assimilé au p. 100 de quartz recherché.

Vérification des résultats.

Il y a deux façons de vérifier si les reconstitutions minéralogiques ainsi réalisées sont satisfaisantes. D'une part il ne doit ni manquer ni rester d'aluminium après toutes les déductions ; d'autre part la somme des teneurs en quartz + glauconite en grains + orthose + rutile doit correspondre à la somme granulométrique limons + sables.

En se fondant sur de tels principes, nous avons pu utiliser quatre voies de reconstitution minéralogique indépendantes les unes des autres.

Voie 1. Reconstitution minéralogique avec extraction préalable des « amorphes » et des « oxydes » (méthode du C.N.R.S.-Nancy).

La succession des opérations est logique et rigoureuse. En effet, exceptée l'analyse chimique totale, toutes les analyses sont faites *à la suite* sur le même échantillon :

— extraction des « amorphes » par le réactif de Tamm ;
— puis extraction des « oxydes » par le réactif de Mehra et Jackson ;
— granulométrie sur échantillon ainsi « nettoyé » ;
— enfin, analyse totale de l'argile débarrassée des « amorphes » et « oxydes ».

Les granulométries obtenues après extraction des « amorphes » et « oxydes » diffèrent complètement de celles réalisées normalement. Après « nettoyage », on trouve beaucoup plus d'argile dans les horizons (B) et C, et moins de limons et de sables. En revanche, il y a bon accord pour l'horizon A_{22} (tabl. 4).

TABLEAU 4

Comparaison des granulométries normales (Arras) *et après traitement au dithionite* (Nancy)
Comparison between particle-size distributions without (Arras) *and after dithionite treatment* (Nancy)

		A p. 100	LF p. 100	LG p. 100	SF p. 100	SG p. 100	Σ
A_{22}	Arras	11,8	12,1	11,1	56,0	6,7	97,7
	Nancy	11,0	18,2	8,8	52,2	7,8	98,0
$(B)_1$	Arras	44,9	6,2	6,3	35,5	0,9	93,8
	Nancy	53,0	5,6	2,9	31,7	1,6	94,8
C_1	Arras	22,7	6,5	6,4	59,2	1,1	95,9
	Nancy	45,8	4,3	1,9	42,4	1,2	95,6

Il est vraisemblable que le traitement Mehra-Jackson (et plus particulièrement le dithionite) a détruit les grains de glauconite et que le résultat de cette destruction est comptabilisé dans la fraction $< 2\ \mu m$. Cette hypothèse se voit confirmée par l'examen à la loupe binoculaire des limons et sables « nettoyés », parfaitement blancs, où ne se retrouve plus de glauconie.

La fraction $< 2\ \mu m$ analysée à Nancy contient en fait la totalité des minéraux phylliteux des horizons $(B)_1$ et C_1. Les fractions limons et sables récupérées (qui vont pouvoir être analysées) ne contiennent plus que quartz, feldspaths et minéraux lourds.

Par différence on peut apprécier directement et grossièrement la quantité de glauconite en grains qui existait dans les limons et sables (tabl. 5).

TABLEAU 5

Estimation de la teneur en glauconite dans les limons et les sables par comparaison des granulométries avec et sans traitement au dithionite (en p. 100 de la terre fine totale)

Estimation of glauconite content in silts and sands by comparison between particle-size distributions without and after dithionite treatment (as p. 100 of the total fine earth)

	LF	LG	SF	SG	Σ
$(B)_1$.....	0,6	3,4	3,8	—	7,8
C_1	2,2	4,5	16,8	0	23,5

La reconstitution sur la base des données de Nancy a permis d'obtenir une première série de teneurs en quartz (tabl. 9, p. 351).

Voie 2. Reconstitution minéralogique par analyse des limons et sables « nettoyés ».

Nous avons pris comme hypothèse que le fer ayant résisté aux traitements Tamm et Mehra-Jackson n'est plus imputable à de la glauconite mais correspond à des oxydes de fer « résistants ». Quant au potassium, il proviendrait uniquement de l'orthose.

Après reconstitution minéralogique et pondération selon les données granulométriques, nous avons obtenu une deuxième approche des teneurs en quartz (tabl. 6).

TABLEAU 6

Reconstitution minéralogique par analyse des limons + sables « nettoyés » (voie 2) (en p. 100 de la terre fine totale)

Mineralogical reconstitution by analysis of « cleaned » silts + sands (way nº 2) (as p. 100 of the total fine earth)

	Limons + sables « nettoyés »				Amorphes + oxydes Fe, Al, Si	$< 2\ \mu m$	Σ
	Quartz	Orthose	Oxydes de fer résistants	Rutile			
Horizon A_{22}.....	80,10	4,04	0,89	0,42	2,10	11,0	98,55
Horizon $(B)_1$	38,98	1,87	0,25	0,18	3,49	53,0	97,77
Horizon C_1	46,16	2,31	0,34	0,25	1,86	45,8	96,72

Voie 3. Reconstitution minéralogique à partir des analyses totales courantes (horizons totaux).

Faute de mieux, nous avons effectué la correction des « amorphes » et des « oxydes » en utilisant les dosages du fer Deb et de l'aluminium Tamm, seules données disponibles dans ce cas.

Le tableau 7 présente les résultats obtenus sur la base de Fe_2O_3 et de MgO. On peut constater qu'ils s'accordent relativement bien.

TABLEAU 7

Reconstitution minéralogique des limons + sables à partir des analyses chimiques totales (voie 3) (en p. 100 de la terre fine totale)

Mineralogical reconstitution of silts + sands based on chemical analysis (way n° 3) (as p. 100 of the total fine earth)

	Calculs sur la base de Fe_2O_3				Calculs sur la base de MgO			
	Quartz	Glauconite en grains	Orthose	Rutile	Quartz	Glauconite en grains	Orthose	Rutile
Horizon A_{22}	79,0	3,0	3,0	0,4	79,0	2,8	3,2	0,4
Horizon $(B)_1$	37,8	15,2	0	0,1	40,6	8,5	1,2	0,2
Horizon $(B)_2$	48,7	10,5	4,9	0,2	48,1	15,0	2,6	0,2
Horizon C_1	48,7	24,3	0,6	0,2	47,9	26,8	0	0,2

Voie 4. Reconstitution minéralogique à partir des analyses totales courantes (somme pondérée des fractions granulométriques).

Pour chaque fraction, la composition minéralogique a été évaluée selon les principes énoncés plus haut, sauf pour les fractions limons fins dans lesquelles il existe probablement des produits phylliteux qui ne sont plus de la glauconite intacte. Nous avons fondé les calculs sur l'existence de produits intermédiaires entre la glauconite en grains et la fraction $< 2\ \mu m$. La somme pondérée de toutes les fractions $> 2\ \mu m$ fournit de nouvelles valeurs pour le quartz des limons et des sables (cf. tabl. 9, p. 351). Cette voie de reconstitution a en outre l'avantage de nous renseigner sur l'abondance de la glauconite en grains au sein des diverses classes granulométriques.

Le tableau 8 traduit bien les deux phénomènes auxquels on pouvait s'attendre *a priori* : diminution de la quantité totale de glauconite en grains à mesure que l'on s'élève dans le solum, et fractionnement corrélatif des grains.

TABLEAU 8

Glauconite en grains et produits phylliteux intermédiaires (voie 4)
(en p. 100 de chaque fraction granulométrique (ligne supérieure),
en p. 100 de la somme limons + sables (ligne inférieure))

Grain glauconite and intermediary phyllosilicates (way n° 4)
(as p. 100 of each size fraction (upper line),
as p. 100 of the sum silts + sands (lower line))

	LF 2-20 µm		LG 20-50 µm		SF_1 50-100 µm		SF_2 100-200 µm		Σ
	Produits phylliteux intermédiaires		Glauconite en grains		Glauconite en grains		Glauconite en grains		Glauconite en grains
Calculs sur la base de	Fe_2O_3	MgO	Fe_2O_3	MgO	Fe_2O_3	MgO	Fe_2O_3	MgO	Fe_2O_3
Horizon A_{22} ..	15,6	10,0	7,9	6,8	2,4	2,8	2,9	2,8	
	2,2	1,4	1,0	0,9	0,9	1,0	0,8	0,8	2,7
Horizon $(B)_1$ ..	69,6	60,6	72,1	72,9	17,9	18,6	9,0	9,6	
	8,8	7,7	9,3	9,4	8,8	9,1	2,1	2,3	20,2
Horizon $(B)_2$ ..	68,9	58,5	68,5	66,3	18,1	17,9	23,1	22,1	
	7,5	6,4	6,9	6,7	10,5	10,4	4,6	4,4	22,0
Horizon C_1....	74,6	60,9	88,4	76,7	32,0	32,8	36,0	31,5	
	6,6	5,4	7,7	6,7	14,7	15,1	12,6	11,0	35,0

2. — *Détermination du quartz par dissolution sélective* (*méthode Kiely-Jackson*, 1965).

Cette technique provoque une dissolution sélective des minéraux argileux mais laisse intacts le quartz et partiellement les feldspaths. Après une attaque au pyrosulfate de sodium, il demeure un résidu où sont dosés K, Na et Ca, éléments qui sont attribués aux trois catégories de feldspaths (orthose, albite, anorthite). La différence entre le K_2O de l'échantillon initial et le K_2O du résidu est considéré comme correspondant au K_2O des argiles micacées dont on peut ainsi évaluer la quantité.

La méthode a été appliquée aux horizons totaux (Voie 5) mais aussi aux principales fractions granulométriques (Voie 6).

Outre des difficultés de manipulation (pertes de matières au cours de lavages répétés du résidu), on se heurte à d'autres problèmes lors des calculs. Les auteurs de la méthode ont proposé toute une série de coefficients de correction afin de compenser la dissolution plus ou moins importante du quartz et des divers feldspaths en fonction de la taille des particules. Nous ne savons rien de la validité de ces correctifs appliqués à des matériaux sédimentaires très argileux.

Toutefois les feldspaths s'avèrent très peu abondants dans notre sol. Ainsi le résidu, mesuré très facilement par simple pesée, représente (sauf pour les fractions < 2 µm) une quantité importante sur laquelle l'erreur relative est faible. Il correspond à peu de choses près au taux de quartz recherché.

Il se pose aussi le problème du choix d'un facteur de transformation pour passer du p. 100 de K_2O attribué aux argiles micacées au p. 100 de ces argiles. Kiely et Jackson (1965) ont proposé de raisonner sur des argiles à 10 p. 100 de K_2O, ce qui est

notoirement trop élevé pour les minéraux argileux de notre sol. Les quatre glauconites vertes analysées ont un taux moyen de K_2O de 6,0 p. 100 et les fractions granulométriques « argile » n'excèdent pas 4,9 p. 100.

La plupart des minéraux argileux sont, outre la glauconite elle-même, des produits de transformation de ce même minéral avec un taux de potassium variable en fonction de leur degré d'altération. Dans le cas d'un horizon pris dans son ensemble, la notion de teneur moyenne en K_2O des argiles micacées n'a guère de sens.

Notons, pour finir, que la méthode Kiely-Jackson est la seule qui permette d'apprécier les teneurs en quartz $< 2\ \mu m$: 9,4 p. 100 en A_{22}, 2,5 p. 100 en B_1 et 1,6 p. 100 en C_1, soit respectivement 1,1, 1,1 et 0,4 p. 100 de la terre fine totale.

3. — *Récapitulation*

L'ensemble des données acquises par les six voies différentes est synthétisé dans le tableau 9.

TABLEAU 9

Teneurs en quartz obtenues par les six voies de calcul (résultats exprimés en p. 100 de la terre fine totale)
Quartz contents achieved by the six ways of calculation (results as p. 100 of total fine earth)

	Voie 1	Voie 2	Voie 3	Voie 4	Voie 5	Voie 6
	Reconstitution avec extraction préalable des « oxydes » et « amorphes »	Reconstitution par analyse des limons et sables « nettoyés »	Reconstitution à partir des analyses chimiques courantes (horizon total)	Reconstitution à partir des analyses chimiques courantes (somme des fractions granulom.)	Méthode Kiely-Jackson (horizon total)	Méthode Kiely-Jackson (somme des fractions granulom.)
Horizon A_{22}	79,7	81,2	80,1 et 80,1	79,9	79,7	77,7
Horizon $(B)_1$	40,6	40,1	38,9 et 41,7	34,6	39,1	34,6
Horizon $(B)_2$			49,2 et 48,6	42,7		
Horizon C_1	49,2	46,5	49,1 et 48,3	40,0	49,8	36,4

Les teneurs en quartz $< 2\ \mu m$ ont été ajoutées aux résultats obtenus par les voies 1, 2, 3 et 4 qui ne concernaient que limons + sables.

Les résultats de l'horizon A_{22} sont particulièrement concordants. Il n'en va pas de même des horizons (B) et C_1 pour lesquels les pourcentages de quartz obtenus par la somme des diverses fractions sont systématiquement inférieurs à ceux fournis directement sur l'horizon total.

Pour le bilan isoquartz, nous retiendrons en définitive les valeurs suivantes (moyennes pondérées) :

— A_{22} = 80,0 p. 100
— $(B)_1$ = 39,2 p. 100
— $(B)_2$ = 47,6 p. 100
— C_1 = 47,8 p. 100 .

V. — Bilan isoquartz

1. — *Principes*

Ce type de bilan suppose la connaissance des teneurs en quartz des principaux horizons, de leur épaisseur et de leur densité apparente.

Nous avons considéré que l'horizon A_{22} pouvait caractériser l'ensemble des horizons A, jusqu'à 45 cm de profondeur. $(B)_1$ et (B_2) représentent respectivement les tranches 45-75 cm et 75-130 cm. Les densités apparentes ont été mesurées : soit 1,51 pour A_{22}, 1,28 pour $(B)_1$, 1,48 pour $(B)_2$ et 1,61 pour C_1.

Mais un tel bilan repose aussi sur quatre hypothèses qu'il n'est pas facile de vérifier dans la nature :

1) On pose en principe que *le quartz n'a pas été altéré* : il servira donc de *minéral invariant* (²).

2) On suppose que la roche-mère était homogène à l'origine, jusque dans l'horizon C_1 actuel. Grâce à une étude détaillée des données granulométriques (à paraître), une hétérogénéité importante a pu être exclue. Mais une parfaite homogénéité, à la fois granulométrique et minéralogique est purement hypothétique à propos d'un matériau sédimentaire détritique.

3) On admet implicitement qu'il n'y a pas eu érosion en surface, ni apports ou contamination superficiels, ni mouvements de masse latéraux, etc... En fait, l'existence dans les horizons A de cailloux de grès ferrugineux, manifestement allochtones, laisse planer un certain doute.

4) L'horizon profond, choisi comme horizon de référence, devrait être constitué d'une roche inaltérée. Après avoir éliminé l'horizon C_2 comme trop différent granulométriquement, nous avons choisi C_1, débutant à 130 cm de profondeur et qui a certainement subi un début d'évolution pédologique. Le raisonnement isoquartz implique que sa composition chimique actuelle était également celle des autres horizons à l'origine.

Connaissant les poids actuels de chacun des horizons :

$$P_H^t = 1\ dm^2 \times \text{profondeur} \times \text{densité apparente}$$

... et leur poids à l'origine :

$$P_H^O = P_H^t \times \frac{\text{p. 100 actuel de quartz de l'horizon considéré}}{\text{p. 100 actuel de quartz de l'horizon de référence}}$$

..., on est en mesure de calculer les pertes ou les gains pondéraux globaux qu'ils ont subi.

Après quoi, il est facile de comparer le poids actuel d'un oxyde, d'un minéral ou d'une fraction granulométrique :

$$P_x^t = P_H^t \times \text{p. 100 actuel en x de l'horizon considéré}$$

(²) Ce qui n'exclut pas que les particules quartzeuses puissent avoir subi une fragmentation.

... avec le poids à l'origine :

$$P_x^O = P_H^O \times \text{p. 100 actuel en x de l'horizon de référence .}$$

... et d'en déduire à nouveau les pertes et les gains.

2. — *Bilan pondéral global* (tabl. 10)

Ce premier bilan fournit déjà de précieuses indications : les horizons A apparaissent comme fortement appauvris (pertes de 40 p. 100 en poids) tandis que l'horizon

TABLEAU 10

Bilan pondéral global (poids exprimés en hg/dm²)
Inclusive weight balance (weight as hg/dm²)

Horizon	Profondeur	Poids actuel	Poids à l'origine	Différence	Différence en p. 100 du poids à l'origine
A.....	0-45 cm	67,95	113,61	— 45,66	— 40,1 p. 100
$(B)_1$.....	45-75 cm	38,40	31,48	+ 6,92	+ 21,9 p. 100
$(B)_2$.....	75-130 cm	81,40	81,07	+ 0,33	+ 0,4 p. 100
C_1	130-170 cm	64,40	64,40	0	0
$A + (B)_1$	Σ 0-75 cm	106,35	145,09	— 38,74	— 26,7 p. 100

$(B)_1$ montre un net enrichissement (+ 22 p. 100). Quant au $(B)_2$, le gain de 0,4 p. 100 est certainement très inférieur aux erreurs d'analyses et de calculs et ne nous paraît donc pas significatif.

3. — *Bilan des oxydes* (tabl. 11)

TABLEAU 11

Bilan des six principaux oxydes. Gains ou pertes en poids et en p. 100 de l'horizon à l'origine
Balance of the six main oxides.
Gains or losses as weight and as p. 100 of the horizon as it would have been at the origin

Horizon	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	CaO
A	— 23,56 — 28,1 p. 100	— 5,62 — 72,7 p. 100	— 8,41 — 75,7 p. 100	— 2,34 — 78,3 p. 100	— 1,23 — 87,8 p. 100	— 0,27 — 84,9 p. 100
$(B)_1$	+ 2,56 + 11,0 p. 100	+ 1,44 + 67,2 p. 100	+ 1,02 + 33,1 p. 100	+ 0,10 + 11,7 p. 100	+ 0,08 + 20,9 p. 100	+ 0,04 — 43,1 p. 100
$(B)_2$	— 1,09 — 1,8 p. 100	+ 0,03 + 0,5 p. 100	— 0,39 — 4,9 p. 100	+ 0,02 + 0,7 p. 100	— 0,08 — 7,7 p. 100	— 0,04 — 17,6 p. 100
$\Sigma A + (B)_1$.....	— 21,0 — 19,6 p. 100	— 4,18 — 42,3 p. 100	— 7,39 — 52,1 p. 100	— 2,25 — 58,8 p. 100	— 1,15 — 64,2 p. 100	— 0,35 — 75,8 p. 100

Les résultats pour les six principaux éléments (Si, Al, Fe, K, Mg et Ca) (3) confirment entièrement le bilan global : horizons A très appauvris, horizon $(B)_1$ nettement

(3) Les teneurs en TiO_2 et en Na_2O sont très faibles. De ce fait les erreurs relatives risquent d'être très importantes de sorte qu'un bilan de ces deux oxydes n'a guère de signification.

enrichi. Et, que l'on raisonne en poids total ou en oxydes, *les pertes de matières des horizons A ne sont absolument pas compensées par les gains du sommet du* (B). En ce qui concerne les 75 premiers centimètres du sol actuel ($A + B_1$), le bilan fait apparaître un solde négatif qui varie, suivant les éléments, de 19,6 p. 100 à 75,8 p. 100.

L'horizon $(B)_2$, quant à lui, ne paraît pas avoir connu de gains ou de pertes sensibles de matières par rapport à l'horizon C_1 de référence.

Or, la dynamique de l'eau est, dans ce type de sol, essentiellement latérale, puisque tout au long de l'hiver et jusqu'en mai une nappe hypodermique circule temporairement au contact du « plancher » argileux. Il en est de même lors des fortes pluies d'été.

Dans ces conditions, il nous paraît possible de conclure que *les matières perdues par les horizons A n'ont pas migré verticalement au sein du solum, mais qu'elles ont donc été évacuées latéralement hors du profil.*

Nature des pertes des horizons A (tabl. 12).

Ce tableau montre que la composition des pertes des horizons A s'avère très voisine à la fois de celle de la glauconite en grains et de celle des fractions « argile » $< 2\ \mu m$ de l'horizon de référence. Cette ressemblance n'est certainement pas fortuite

TABLEAU 12

Pertes des horizons A et comparaison avec les minéraux phylliteux de l'horizon de référence
Losses from the A horizons and comparison with clay minerals of the reference horizon

	Pertes en poids hg/dm²	Composition de ces pertes en p. 100 de leur somme	Composition de la glauconite en grains en p. 100 horizon C_1 SF_2	Composition de la fraction $< 2\ \mu m$ horizon C_1 en p. 100
SiO_2	— 23,56	56,87	56,48	55,27
Al_2O_3	— 5,62	13,57	11,71	16,59
Fe_2O_3.....	— 8,41	20,30	21,90	18,39
K_2O	— 2,34	5,65	6,50	5,71
MgO	— 1,23	2,96	3,05	3,38
CaO.....	— 0,27	0,65	0,90	0,12
Na_2O.....	—	—	0,16	0,11
TiO_2.....	—	—	0,15	0,44
Σ	— 41,43	100,00	100,85	100,01

et traduit, à notre avis, le fait que *l'appauvrissement des horizons A correspond soit à un entraînement mécanique des minéraux phylliteux hors du profil, soit à une dissolution totale des argiles avec évacuation de tous les résidus.*

Nature des gains de l'horizon $(B)_1$.

Si l'on considère les gains en oxydes de l'horizon $(B)_1$, leur composition chimique s'établit ainsi (en p. 100) : $SiO_2 = 49,0$; $Al_2O_3 = 27,7$; $Fe_2O_3 = 19,6$; $K_2O = 1,9$; $MgO = 1,6$. Obtenue à partir de chiffres petits en valeur absolue et pouvant donc être entachés d'une forte erreur relative, elle est délicate à interpréter. Il pourrait s'agir de minéraux argileux 2/1 pauvres en potassium auxquels s'ajouteraient des oxydes ou hydroxydes de fer et d'aluminium relativement abondants.

4. — *Bilan des espèces minérales*

La lecture du tableau 13 appelle de notre part les réflexions suivantes. Le bilan des feldspaths apparaît d'une interprétation délicate : on ne voit pas comment il

TABLEAU 13

Bilan isoquartz des feldspaths, de la glauconite en grains et de la somme des minéraux phylliteux 2/1 (y compris la glauconite en grains). *Gains et pertes pondéraux*

Isoquartz balance of feldspars, of grain glauconite and of the sum of 2/1 *phyllosilicates* (including grain glauconite). *Weight gains and losses*

Horizon	Total des feldspaths		Glauconite en grains (limons + sables)		Somme des minéraux phylliteux 2/1 (y compris la glauconite en grains		Rappel des gains ou pertes globaux de l'horizon en poids
	En poids	En p. 100 du poids originel	En poids	En p. 100 du poids originel	En poids	En p. 100 du poids originel	
A	+ 1,01	+ 61,5	— 29,66	— 91,5	— 43,9	— 84,2	— 45,66
$(B)_1$	+ 0,06	+ 13,3	— 4,36	— 48,6	+ 5,5	+ 38,2	+ 6,92
$(B)_2$			— 11,30	— 48,9	— 0,3	— 0,9	+ 0,33
$\Sigma A + (B)_1$ ..	+ 2,09	+ 51,1	— 34,02	— 82,2	— 38,4	— 57,6	

pourrait y avoir un gain de ces minéraux en A et en B. Il est établi certainement sur des valeurs entachées de trop d'erreurs.

En revanche celui de la glauconite en grains est conforme à ce que l'on pouvait en attendre.

Enfin, on constate que les minéraux phylliteux 2/1 représentent la quasi-totalité des pertes des horizons A et la majeure partie des gains de l'horizon $(B)_1$. Il n'y a là rien de surprenant puisque la composition du matériau originel se ramène, à peu de choses près, à un mélange quartz + minéraux argileux 2/1. Le quartz étant supposé invariant par hypothèse, les minéraux 2/1 peuvent seuls constituer les gains ou les pertes (avec l'humidité et les matières organiques, puisque nous raisonnons toujours sur la terre fine totale).

5. — *Bilan des fractions granulométriques*

Connaissant la granulométrie actuelle des horizons A et (B) ainsi que celle à

l'origine (horizon de référence), on peut établir des bilans isoquartz selon les mêmes principes que précédemment sur n'importe quelle fraction.

Les résultats consignés dans le tableau 14 permettent de chiffrer « l'argilisation » des horizons (B) et l'appauvrissement en argile des horizons A. On constate aussi un

TABLEAU 14

Bilan des fractions granulométriques
(gains ou pertes en valeurs pondérales absolues et en p. 100 du poids à l'origine)
Size fraction balance (gains or losses as absolute values and as p. 100 of the original weight)

Horizon	A 0-2 µm	LF 2-20 µm	LG 20-50 µm	SF_1 50-100 µm	SF_2 100-200 µm	SG 200-2 000 µm
A 0-45 cm	— 17,8 — 68,9 p. 100	+ 0,84 + 11,3 p. 100	+ 0,27 + 3,7 p. 100	— 16,5 — 43,2 p. 100	— 12,6 — 43,4 p. 100	+ 3,3 + 264 p. 100
$(B)_1$ 45-75 cm	+ 10,1 + 141,1 p. 100	+ 0,33 + 16,0 p. 100	+ 0,41 + 20,3 p. 100	— 1,40 — 13,2 p. 100	— 3,6 — 45,1 p. 100	0 0
$(B)_2$ 75-130 cm	+ 7,49 + 40,7 p. 100	+ 0,35 + 6,6 p. 100	+ 0,02 + 0,3 p. 100	+ 2,80 + 10,2 p. 100	— 10,4 — 50,1 p. 100	— 0,32 — 35,9 p. 100
Σ des 3 horizons	— 0,19 — 0,3 p. 100	+ 1,52 + 10,3 p. 100	+ 0,70 + 4,8 p. 100	— 15,09 — 19,8 p. 100	— 26,69 — 46,1 p. 100	+ 2,98 + 120 p. 100

enrichissement en limons des 130 premiers cm du profil, associé à des pertes corrélatives en sables fins.

Nous savons que la désagrégation des grains de glauconite au sein des horizons (B) d'altération est responsable de modifications granulométriques qui vont dans le sens d'un passage des classes sables fins (50 à 200 µm) vers les classes limons (2 à 50 µm). Aussi un bilan a été établi non plus sur les fractions granulométriques brutes mais *en tenant compte uniquement du quartz* (tableau 15 réalisé à partir des données de la voie 4).

On note que du quartz très fin (< 2 µm) s'est formé dans les horizons supérieurs. Dérive-t-il d'une fragmentation des limons ? Est-ce l'indice d'une altération chimique

TABLEAU 15

Bilan du quartz par fractions granulométriques
(gains ou pertes en valeurs pondérales absolues et en p. 100 du poids à l'origine)
Quartz balance in size-fractions (gains or losses as absolute values and as p. 100 of the original weight)

	A 0-2 µm	LF 2-20 µm	LG 20-50 µm	SF_1 50-100 µm	SF_2 100-200 µm	SG 200-2 000 µm
A	+ 0,25 + 50 p. 100	+ 4,33 + 243 p. 100	+ 5,14 + 425 p. 100	— 7,45 — 26 p. 100	— 5,91 — 27 p. 100	+ 3,61 + 386 p. 100
$(B)_1$	+ 0,31 + 252 p. 100	+ 0,20 + 45 p. 100	+ 0,22 + 73 p. 100	+ 0,57 + 8 p. 100	— 1,32 — 24 p. 100	+ 0,02 + 10 p. 100
$(B)_2$	+ 0,09 + 29 p. 100	+ 0,33 + 29 p. 100	+ 0,54 + 70 p. 100	+ 4,82 + 26 p. 100	— 5,68 — 41 p. 100	— 0,13 — 21 p. 100
Σ des 3 horizons	+ 0,65 + 69 p. 100	+ 4,86 + 145 p. 100	+ 5,90 + 259 p. 100	— 2,06 — 4 p. 100	— 12,91 — 31 p. 100	+ 3,51 + 199 p. 100

intense ? En tout cas, ce résultat semble logique, en accord avec l'existence d'un horizon E « albique ».

Pour les autres fractions granulométriques, on perçoit très bien un *affinement des grains de quartz* à mesure que l'on monte dans le profil : il y a diminution des sables fins et gains importants de limons.

Cet affinement peut être interprété de trois façons :

1) Le matériau était effectivement homogène à l'origine. Il y a eu *division* des quartz.

2) Toujours dans l'hypothèse d'un matériau homogène, il y a eu *contamination* des horizons de surface par des apports limoneux.

3) Le matériau n'était pas vraiment homogène à l'origine. Une « dérive granulométrique » existait dès le départ.

Nous ne disposons d'aucun moyen pour choisir parmi ces trois interprétations. Notons seulement que la « dérive » aurait pu jouer dans n'importe quel sens, aussi bien vers le grossissement des grains de quartz que vers l'affinement. L'effet observé ici correspond mieux à un saupoudrage de limons ou à une micro-division pédogénétique.

Remarquons que l'interprétation numéro 3 remet en cause le raisonnement isoquartz suivi jusqu'ici et basé sur l'hypothèse d'un matériau homogène.

Quant aux grains de sables grossiers, ils peuvent être expliqués de deux façons :

1) Par la « dérive granulométrique » toujours possible. Mais les horizons C_2 et C_4 montrent des granulométries beaucoup plus grossières que les quatre horizons sur lesquels nous raisonnons. L'augmentation des sables grossiers en surface ne concorde pas avec cette évolution en profondeur.

2) Par des contaminations d'origine extérieure. Dans cet ordre d'idées, on pourrait faire appel à l'influence des fragments de grès ferrugineux qui ont, en effet, un squelette sableux grossier.

Les différences granulométriques des fractions quartzeuses apparaissent également sous la forme classique des « squelettes granulométriques » (limons et sables « nettoyés ») (tabl. 16 et 17).

TABLEAU 16

« *Squelettes granulométriques* » *des limons et sables « nettoyés »* (débarrassés de la glauconite en grains par traitements aux réactifs de Tamm et Mehra-Jackson. Voies 1 et 2)

« *Granulometric skeletons* » *of « cleaned » silts and sands* (i. e. cleared of grain glauconite with Tamm and Mehra-Jackson reactives. Ways nº 1 and 2)

Horizon	LF p. 100	LG p. 100	SF p. 100	SG p. 100
A_{22}	20,9	10,1	60,0	9,0
$(B)_1$	13,4	6,9	75,8	3,8
C_1	8,6	3,8	85,1	2,4

TABLEAU 17

« *Squelettes granulométriques* » *des limons et sables non glauconieux*
(résultats obtenus par la voie 4)

« *Granulometric skeletons* » *of the non-glauconious silts and sands*
(results achieved by way n° 4)

Horizon	LF p. 100	LG p. 100	SF_1 p. 100	SF_2 p. 100	SG p. 100
A_{22}	12,8	12,5	37,8	28,6	8,1
			66,4		
$(B)_1$	7,0	5,0	56,1	30,0	1,9
			86,1		
$(B)_2$	6,2	4,7	66,2	21,5	1,0
			87,7		
C_1.....	5,6	3,3	50,5	38,8	1,5
			89,3		

VI. — Discussion, comparaisons et conclusions

Grâce à la confrontation de plusieurs techniques, tant qualitatives que quantitatives, il a été possible d'évaluer les teneurs en quartz des principaux horizons du profil étudié. La convergence des différents résultats a permis d'asseoir le bilan isoquartz avec une sécurité raisonnable.

Son établissement a permis d'apprécier les gains et les pertes des principaux éléments chimiques et des minéraux. Enfin, le bilan vient corroborer des observations macro et micromorphologiques ou hydrodynamiques.

Cependant, l'interprétation des données ainsi acquises n'est pas toujours aisée. En particulier celles obtenues pour les fractions granulométriques non glauconieuses conduit à un dilemme : l'affinement du quartz dans les horizons A par rapport aux horizons (B) et C résulte-t-il uniquement d'une microdivision des grains de quartz au cours de la pédogenèse ou doit-il être expliqué aussi par une hétérogénéité de la roche-mère à l'origine ?

Dans le premier cas, tous les arguments qualitatifs et quantitatifs s'accordent harmonieusement. Dans le second cas, le bilan isoquartz est remis en cause dans ses principes mêmes.

* * *

Jusqu'ici les bilans isoquartz ont peu été utilisés en pédologie. En ce qui concerne les sols développés sur des matériaux sédimentaires, on peut seulement faire référence aux travaux de Nguyen Kha (1973, 1975) sur des pélosols lorrains et de Jamagne *et al.* (à paraître) sur des limons lœssiques.

Lors de l'établissement de bilans sur deux profils (pélosol brunifié et pélosol vertique), le premier auteur cité trouve des pertes de l'ordre de 50 p. 100 de matières

(principalement des argiles fines) dans l'horizon de surface. Le phénomène dominant, à l'origine de la plus grande partie des pertes, est une érosion sélective. L'appauvrissement a lieu sous forme de suspensions argileuses évacuées dans les eaux de ruissellement, dans les écoulements hypodermiques et par drainage oblique. Ces faits ont été démontrés et mesurés sur le terrain grâce à des dispositifs de collecte des eaux (Nguyen Kha *et al.*, 1976).

Mais les pélosols de Lorraine sont des sols peu évolués, de pH presque neutre, situés sur pentes fortes, ce qui constitue un facteur favorable aux migrations latérales. Si les roches-mères très argileuses sont comparables à celles des planosols de Champagne humide, les autres facteurs de la pédogenèse sont tout de même très différents.

Réalisé sur un sol brun lessivé issu d'un limon loessique, un bilan isoquartz (Jamagne *et al.*) met en évidence 6,8 p. 100 de pertes pondérales dans les horizons éluviaux, compensées par des gains équivalents dans les horizons Bt sous-jacents. Dans ce cas, il s'agit bien d'une illuviation verticale qui n'affecte que 15 p. 100 de l'argile présente à l'origine dans les horizons A.

En ce qui concerne le profil présenté ici, le « ventre » d'argile n'est pas le résultat d'une illuviation, mais correspond bien à la conjonction de deux phénomènes :

— une « argilisation » des grains de glauconie en cours d'altération, phénomène ascendant qui s'amplifie à mesure que l'on se rapproche de la surface du sol ;

— un appauvrissement en argile des horizons supérieurs, processus à dynamique latérale.

Les horizons argileux sont donc bien essentiellement des horizons (B) d'altération. En conséquence, ce type de sol doit être classé parmi les AQUEPTS de la Soil Taxonomy, et une place devra lui être faite dans la nouvelle « approximation » de la classification française.

Remarque.

Des bilans isoquartz similaires sont en cours de réalisation sur trois autres planosols de granulométrie et de minéralogie différentes. Il sera ainsi possible de connaître si les faits établis pour ce premier profil sont généralisables et si les conclusions peuvent être étendues à l'ensemble des sols à forte différenciation texturale de Champagne humide.

Il reste également à analyser le processus exact de l'appauvrissement : migrations latérales sous la forme de suspensions ou altération chimique des minéraux argileux ? Et, dans cette deuxième hypothèse, faut-il invoquer l'intervention de composés organiques ou la ferrolyse (Brinkman, 1979) ? Autant de problèmes qui feront l'objet d'études ultérieures.

Reçu pour publication en juillet 1980.

Remerciements

L'auteur tient à remercier très vivement Mme N. Van Oort, MM. H. Cielsielski, J. Dejou, M. Hervio, M. Robert, J. Rouiller, G. Soignet, B. Souchier, G. Veneau et G. Yart sans lesquels ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

Summary

Isoquartz balance tried on a Planosol from Paris Basin

This dystric planosol is developed in a very particular sedimentary deposit of the Cretaceous : the glauconious « green sands ». It was selected because of its mineralogical simplicity. The original uniformity of the particle-size distribution has been also verified.

The purpose was to carry out an isoquartz check. For this purpose, very different methods and reasonings have been used in order to lead to a satisfactory mineralogical reconstitution. The good cross-checking of the various results, especially concerning the quartz contents, has made it possible to base the results on sufficiently tested values.

The isoquartz balance shows three main facts :

1) A loss of 27 p. 100 in weight over the 75 upper cm of the profile and of 40 p. 100 from the E horizons.

2) The very large losses measured from the E horizons are not at all counter balanced by the small accumulation recorded in the upper part of the (B) horizon. We can thus conclude that *the loss has been laterally withdrawn out of the profile.*

3) The chemical constitution of the losses of the E horizons is the same as for the clay minerals of the parent materials (grains of glauconie and < 2 µm fraction). It seems possible to draw the conclusion that the loss of clay of the upper layers is either a consequence of the withdrawal of tiny particles in suspension or of a complete weathering of the clay minerals with a draining off of all the residues.

The clayey horizons must be considered mainly as (B) weathering horizons. At the present time, this type of profile E/(B) is mentioned neither in the French soil classification nor in the Soil Taxonomy.

Zusammenfassung

Versuch einer Isoquartz bilanz mit einem Planosol vom Pariser Becken

Dieser saure Planosol ist auf einem ganz besonderen Ablagerungsmuttergestein des älteren Kreidealters entstanden : glaukonitischer « grüner Sand ».

Es wurde unter anderem ausgewählt auf Grund seiner mineralogischen Einfachheit. Seine urspruengliche Homogenität wurde ebenfalls überprüft.

Unser Ziel war die Erstellung einer Isoquarzbilanz. Sehr verschiedene Methoden und überlegungen wurden angewändet, um eine genaue mineralogische Rekonstitution zu erlangen.

Die relativ gute Übereinstimmung der verschiedenen Ergebnisse, besonders hinsichtlich des Quarz, ermöglichte es, die Bilanz auf ausreichend gesicherten werten aufzubauen. Drei wesentliche Tatsachen ergeben sich aus der Isoquartzbilanz :

1) Ein Gewichtsverlust von 27 p. 100 in den 75 ersten Zentimetern des Profils und von 40 p. 100 in den ausgemagerten Oberflächenschichten.

2) Ein Verlust äusserstwichtiger Stoffe tritt in den A-Horizonten auf der keineswegs ausgeglichen wird durch die geringe Anhänfung im oberen Teil der Horizonte (B). Die Verluste wurden dem nach seitlich ausserhalb des Profils befördert.

3) Die chemische Zusammensetzung der Verluste der A-Horizonte stimmt besonders gut mit deren der Phyllitschicht des Profils überein (Anteil niedriger als 2 µm und Körnerglaukonie).

Man kann wahrscheinlich daraus folgern, dass die Ausmagerung der A-Horizonte auf ein Hinwegreissen der freischwebenden Teile oder auf die Zerstörung der tonhaltigen mineralien mit totaler Räumung der Rückstände zurück-zuführen ist.

Diese Bilanz bestätigt was früher schon behauptet wurde : die tonhaltigen Horizonte sind im wesentlichen als Verwitterungshorizonte zu betrachten. Diese Art von Profil E/(B) ist heutzutage weder in der französischen Klassification noch in der Soil Taxonomy berücksichtigt.

РЕЗЮМЕ

Опыт баланса изокварца в планосоле парижского бассейна
Методика и результаты.
БЭЗ Д.

Исследованный кислый планосоль *** развивается на особенных осадочных породах : « зелёные пески » типа глауконита. Выбрали его, потому что его минералогический состав проще других. Проверилась и его первичная гомогенность.

Целью было осуществление баланса изокварца. Применились очень разные методы и рассуждения, чтобы получить очень точное минералогическое восстановление.

Сопоставление разных результатов/в том числе результаты в отношении кварца/ позволило основать баланс на довольно надёжных величинах. Баланс изокварца показывает три основных факта :

1) потерю веса на 27 р. 100 в первых 75 сентиметрах профиля и на 40 р. 100 в верхних обеднённых горизонтах.

2) очень важные потери веществ в горизонтах А, которых далеко не уравновешивает маленькая аккумуляция в верхней части горизонтов /б/. *Такии оьразои, эти пошери удалились стороной от профиля.*

3) химический состав потер горизонтов А отлично соответствует химическому составу фракции филлитов профиля /фракция ниже 2 микрона и глаукония в зёрнах/. Возможно заключить, что обеднение горизонтов А соответствует *переводу частиц в суспензию или разрушению глинистых минералов с целым удалением остатков.*

Баланс изокварца утверждает предыдущие предположения : глинистые горизонты нужно считать горизонтами /б/ выветривания. В настоящее время, этот тип профиля Е/ /б/ нельзя включать во французскую классификацию или в Soil Taxonomy.

*** Планосоль : Интразональная почва, имеющая в своём профиле резко выраженный глинистый уплотненный горизонт или Хардпэн, образующийся в результате цементации или уплотнения под лесом или травянистой растительностью в условиях от умеренно теплого до тропического, и от избыточного влажного до полусухого климата, обычно с колеблющимся уровнем грунтовых вод.

Références bibliographiques

BAIZE D., 1974. Les sols à forte différenciation texturale de la région d'Auxerre et le problème de leur pédogenése. *Sci. Sol* (1), 5-22.

BAIZE D., 1977. Existence de planosols d'altération directe dans le Bassin de Paris. *C. R. Acad. Sci.* Paris, Série D, **284,** 275-277.

BEGON J. C., JAMAGNE M., 1972. Sur la genèse de sols limoneux hydromorphes en France. In *Pseudogley and gley. C. R. des commissions V et VI de l'Ass. Intern. Sci. Sol,* Stuttgart, 307-318.

BRINKMAN R., 1979. *Ferrolysis, a soil-forming process in hydromorphic conditions.* Centre for agricultural publishing and documentation. Wageningen, 106 p.

DOUILLET P., ODIN G. S., 1968. Etude chimique et minéralogique de grains de glauconie provenant des formations crétacées et tertiaires du Bassin de Paris. *Bull. Gr. Fr. Argiles* XX (1), 13-24.

DUDAL R., 1972. Planosols. In *Pseudogley and gley. C. R. des commissions V et VI de l'Ass. Intern. Sci. Sol,* Stuttgart, 275-285.

FAVROT J. C., LEGROS J. P., 1972. A propos d'un type de sol hydromorphe en France : le planosol lithomorphe. *Bull. Ass. Fr. Etud. Sol* (6), 243-249.

FEDOROFF N., 1968. Genèse et morphologie de sols à horizon B textural en France atlantique. *Sci. Sol* (1), 29-65.

JAMAGNE M., FRIDLAND V. M. *et al.* (à paraître). *Les caractéristiques comparées des sols derno-podzoliques de la partie européenne de l'U.R.S.S. et des sols lessivés de France.* Versailles-Moscou.

KIELY P. V., JACKSON M. L., 1965. Quartz, feldspar and mica determination for soils by sodium pyrosulfate fusion. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **29** (2), 159-162.

NGUYEN KHA, 1973. *Recherches sur l'évolution des sols à texture argileuse en conditions tempérées et tropicales.* Thèse. Nancy, 156 p.

NGUYEN KHA, PAQUET H., 1975. Mécanismes d'évolution et de redistribution des minéraux argileux dans les pélosols. *Sci. Géol. Bull.* **28** (1), 15-28.

NGUYEN KHA, ROUILLER J., SOUCHIER B., 1976. Premiers résultats concernant une étude expérimentale du phénomène de l'appauvrissement dans les pélosols. *Sci. Sol* (4), 259-267.

SOUCHIER B., LELONG F., 1970. Détermination quantitative par voie chimique des constituants minéralogiques des sols tempérés. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.* **23** (3-4), 95-112.

WEAVER C. E., POLLARD L. D., 1973. *The chemistry of clay minerals*. Elsevier. Amsterdam, 213 p. (voir chap. Glauconite p. 25).

Ann. agron., 1980, **31** (4), 363-383.

Caractérisation du complexe d'échange des sols acides
Le taux d'acidité d'échange et sa signification pédogénétique sous climat tempéré

P. ESPIAU * et G. PEDRO **

* *Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques L. Emberger, C.N.R.S., BP* 5051, 34033 *Montpellier*

** *Station de Science du Sol, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,* 78000 *Versailles*

Résumé

Les questions posées par la caractérisation physico-chimique des sols acides étant précisées, l'analyse porte sur la définition et la signification de l'acidité d'échange. Le problème essentiel est celui qui résulte de la nature même des ions aluminium en solution. Un certain nombre de résultats expérimentaux permettent d'illustrer les conséquences qui en découlent, mais il apparaît que, dans quelques cas, les interactions protons-aluminium ne suffisent pas seules à en rendre compte. Cela met alors en cause des mécanismes supplémentaires qui ne font d'ailleurs pas l'objet de ce travail.

Les problèmes relatifs à la capacité d'échange des sols acides sont examinés ensuite à la lumière des connaissances sur les charges permanentes et les charges variables, ce qui conduit à mettre l'accent sur la notion de C.E.C. effective. Un schéma résume l'essentiel des données acquises à ce jour et fait apparaître la complexité des phénomènes.

Dans la pratique, un simple traitement des sols par une solution de sel neutre (KCl N) permet de déterminer l'acidité d'échange et la C.E.C. effective, à partir desquelles il est aisé de calculer le taux d'acidité d'échange. Dans l'étude de la pédogenèse acide des régions tempérées, ce dernier paramètre associé au pH KCl constitue alors un indicateur de choix de ce qui se passe actuellement. Mais, naturellement, il apparaît toujours nécessaire de confronter ce genre de données physicochimiques avec les caractérisations cristallochimiques habituelles (minéraux argileux-oxydes libres) ; c'est en effet une des seules manières de savoir si la pédogenèse envisagée est une simple continuation ou bien si elle se trouve en rupture par rapport à la pédogenèse antérieure.

I. — Introduction

La caractérisation du complexe d'échange des sols a depuis longtemps préoccupé les pédologues du fait de ses implications à la fois agronomiques et pédogénétiques. On a coutume en effet depuis Hissink (1925) d'utiliser la notion de « Taux de saturation » : $V = \frac{S}{T} \times 100$, qui représente la fraction du complexe d'échange saturé par des cations de nature basique : Na, K, Ca, Mg ; S étant la somme des cations échangeables basiques (exprimée en milliéquivalents/100 g de sol) et T la capacité d'échange, c'est-à-dire la somme des déficits de charge superficielle (évaluée aussi en milliéquivalents/100 g de sol) devant être compensés pour obtenir l'électroneutralité des particules solides constituant le milieu. Généralement la mesure de T se fait d'une façon *standard*, après traitement par une solution normale d'acétate d'ammonium à

pH 7 et ce, quel que soit le type de sol et quel que soit le degré de saturation, c'est-à-dire que l'on ait affaire à des sols saturés (sols calcaires, sols alcalins)... où à l'autre extrême, à des sols très désaturés et acides.

Or, il est clair que cette manière d'opérer n'est pas sans poser de problèmes, non seulement au plan méthodologique, mais aussi d'un point de vue plus théorique. Nous voudrions aborder ici l'étude d'une des catégories de sols envisagés dans le paragraphe précédent : il s'agit des *sols acides* où la compensation des charges par des cations basiques est très minoritaire et où l'aluminium superficiel est susceptible de jouer un rôle important. On sait en effet que cette catégorie (correspondant aux sols à pH eau $< 5{,}5$ environ) occupe de très grandes surfaces, surtout dans les régions froides et tempérées humides du globe, puisqu'elle représente *grosso modo* 28 p. 100 de la surface de la terre (Pédro, 1979) et au moins 32 p. 100 de la France (Pédro et Scherer, 1974) (1). De ce fait, il s'agit essentiellement de sols dont la fraction argileuse renferme une forte proportion d'argiles 2/1 présentant des espaces interfoliaires actifs, c'est-à-dire dans lesquels peut se manifester une sorte de « bijection » entre la caractérisation du complexe d'échange et l'évolution cristallochimique des minéraux secondaires.

Devant cet état de choses, il apparaît souhaitable de revoir cette notion de « Taux de saturation », qui ne semble être actuellement, ni le critère le plus adapté, ni le plus significatif pour caractériser le complexe d'échange des sols acides. C'est ce que nous allons tenter de faire dans cet article à la lumière de nos propres résultats ou de ceux parus dans la littérature, sans chercher pour autant à présenter une revue exhaustive. Il faut signaler d'un autre côté, qu'une de nos préoccupations majeures a été de pouvoir disposer d'une méthode de *routine* assortie de bases d'interprétation de la pédogenèse. C'est pour cette raison que l'accent est mis sur l'emploi d'une méthode simple et sur l'analyse des résultats qu'elle a fournis. Le protocole de cette méthode est rappelé au paragraphe suivant, qui sera suivi d'une sorte d'analyse critique relative à la signification véritable des résultats pouvant être ainsi obtenus. Les relations de ceux-ci avec la pédogenèse sont examinées au dernier paragraphe ; elles concernent des sols pour lesquels le complexe d'altération est en majeure partie constitué d'argiles 2/1. Ces résultats ne peuvent être transposés au cas des andosols qu'avec prudence. Ces sols développés sur roches volcaniques vitreuses sont caractérisés par des constituants aluminosiliciques mal formés, pour lesquels il n'existe pas de limite nette entre ce qui ressort de la réactivité superficielle et ce qui revient à la constitution cristallochimique des particules. Les horizons B_1 de certains sols podzoliques constituent également des cas particuliers (Rouiller *et al.* à paraître) au sujet desquels on peut concevoir, soit un enrobage des argiles par les hydroxydes de fer et d'aluminium, soit la prépondérance de ces constituants qui, dans les deux cas, confèrent aux sols leurs propriétés physicochimiques. Ces situations sont probablement à rapprocher de celles réalisées dans certains sols tropicaux (cf. par exemple Van Raij et Peech, 1972).

II. — Insuffisance des critères habituels

Dès que l'on se trouve en milieu acide, donc pauvre en bases, les cations compensateurs des charges sont essentiellement des cations à caractère *acide*, tels Al^{3+}, associés

(1) En outre 60 p. 100 des sols de France sont désaturés et ont une nette tendance à l'acidification.

à des protons H^+. Or, d'après la conception classique, on appréhende le complexe d'échange par le seul taux de saturation $\frac{S}{T} \times 100$, alors que ce qui est effectivement intéressant correspond à $\frac{T - S}{T} \times 100$ qui est en quelque sorte le taux d'acidité superficielle ou taux d'insaturation. Naturellement, à partir des mesures directes de S et T, on peut toujours en déduire T — S ; mais cette façon de procéder est insuffisante à deux points de vue :

— Tout d'abord, on n'a aucun moyen direct d'étudier la constitution exacte de T — S, c'est-à-dire d'indiquer la nature et la proportion de chacun des éléments : H, Al...

— En second lieu, T — S n'est pas précis, car sa valeur est toujours surestimée. Il est donc bien préférable de déterminer T — S *directement* (Daikuhara, 1908).

Il est bon de signaler ici que Hissink (1925), qui est à l'origine de la notion de taux de saturation, mesurait directement T — S d'un côté (en mettant le sol en contact de quantités croissantes de solution de baryte diluée et en dosant la base qui reste dans le surnageant) et S de l'autre ; d'où il en déduisait $T = S + (T - S)$. Mais cette mesure de T — S, qui est parfaitement exacte, ne permet pas pour autant de connaître la constitution de l'acidité d'échange.

Espiau (1978) assimile T — S à l'acidité d'échange obtenue par déplacement avec une solution de KCl N : 5 g de sol sont traités deux fois par agitation pendant une demi-heure avec 50 ml de réactif ; les protons sont dosés par titrimétrie (pH mètre enregistreur) en présence de NaOH 0,1 N, tandis que l'aluminium est déterminé soit par colorimétrie, soit par absorption atomique et la valence 3 lui est attribuée. Ce protocole a été testé par comparaison avec la méthode des extractions successives (Espiau et Peyronnel, 1976). Pour calculer le taux d'acidité d'échange défini par l'expression suivante :

Taux d'acidité d'échange $= Al^{3+} + H^+/K^+ + Na^+ + Ca^{++} + Al^{3+} + H^+$, les bases échangeables sont également dosées dans l'extrait KCl N, sauf K^+ qui est récupéré lors d'une extraction à l'acétate d'ammonium normal.

Les valeurs obtenues dans l'étude d'un certain nombre de sols de l'Aigoual et de Corse (Espiau et Peyronnel, 1977 ; Espiau, 1978) et reprises dans la figure 1, mettent en évidence l'écart qui existe entre la valeur de $\frac{T - S}{T}$ déterminée par la méthode classique et, d'un autre côté, le taux d'acidité d'échange tel qu'il vient d'être défini et qui correspond aussi à $\frac{T - S}{T}$, mais évalué directement et dans d'autres conditions.

Or, la figure 1 fait apparaître, d'une part que la presque totalité des points se retrouve *au-dessus* de la bissectrice et, d'autre part, que la différence entre le taux de désaturation (ordonnée) et le taux d'acidité d'échange (abscisse) s'atténue lorsque les deux valeurs se rapprochent de 100 p. 100. Ceci signifie simplement que S est alors très faible par rapport à T ou à la somme des cations échangeables, mais non que l'acidité d'échange et la valeur T — S tendent à être égales. Leur différence est bien illustrée avec la représentation adoptée par Guillemin *et al.* (1978) qui mettent particulièrement en relief l'importance disproportionnée attribuée aux protons échangea-

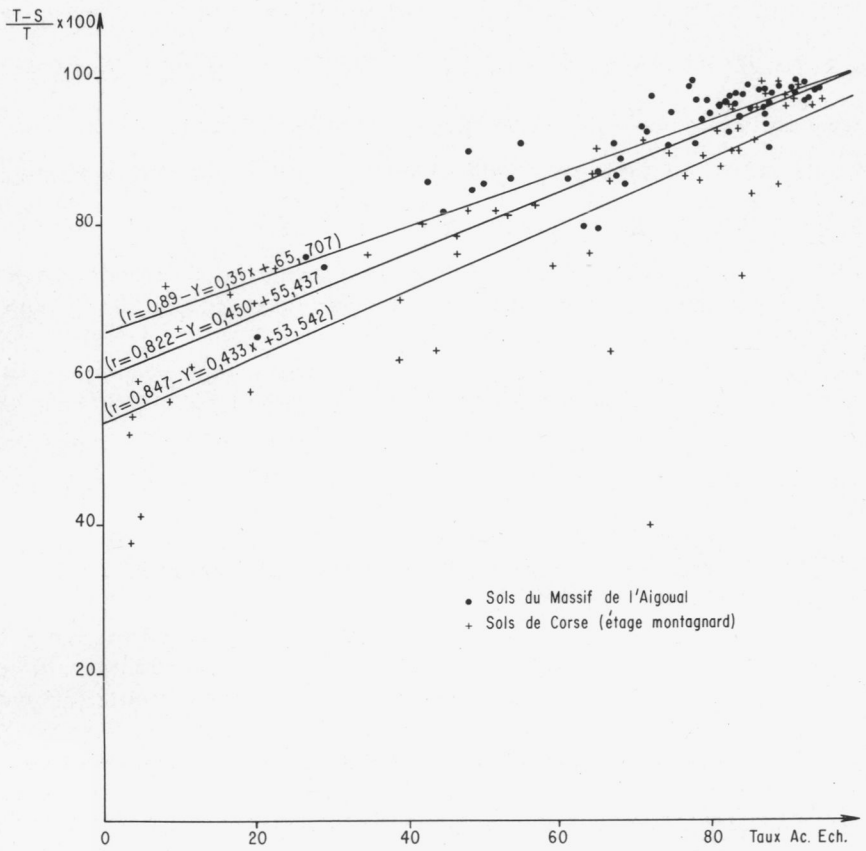


FIG. 1. — *Comparaison du taux de désaturation* (NH_4-AcO, N) *et du taux d'acidité d'échange* (KCl, N).
Comparison between no-saturation rate (NH_4AcO, N) *and exchange acidity rate* (KCl, N).

bles dans l'interprétation classique de T — S, par rapport à celle qu'elle a dans la réalité (acidité d'échange).

Les résultats obtenus par Espiau et Peyronnel (1977) montrent que cette disproportion résulte de la mesure de T plutôt que de celle de S et le travail de Gillman (1979) confirme cet aspect dans le cas des sols riches en kaolinite, oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, c'est-à-dire pour lesquels les charges de surface sont sous la dépendance du milieu. Cet auteur signale à cet égard l'importance du pH, de la force ionique, de la constante diélectrique et même de la valence des contre-ions. Certes, les sols qu'il étudie ne se situent pas dans le même contexte que ceux auxquels nous nous intéressons, mais les résultats qu'il présente montrent cependant que d'importantes variations dans la force ionique de l'extractant ($BaCl_2$) affectent peu les résultats relatifs aux cations échangeables. Bien que Gillman fasse une critique théorique, basée sur le travail de Amédée et Peech (1976), de l'emploi de solutions normales de sels neutres pour la détermination de l'acidité d'échange, ses résultats pour la C.E.C.

sont assez comparables à ceux de la capacité d'échange effective obtenue avec NaCl N et pour la détermination de laquelle on procède au titrage de l'acidité d'échange. Il n'en demeure pas moins qu'à l'avenir, il faudra tenir compte de ce type d'observations et de résultats, au moins lors de l'étude des cas particuliers qui ont été signalés ci-dessus.

Finalement, pour résumer les considérations précédentes, nous pouvons dire que d'une façon générale $\frac{T - S}{T}$ calculé classiquement est *supérieur* au taux d'acidité d'échange.

Or, la différence enregistrée peut venir, soit d'une erreur portant sur l'évaluation de T — S, soit encore d'une erreur concernant la détermination de T, soit enfin des deux à la fois.

Une bonne caractérisation des sols acides nécessite donc de disposer de deux données précises :

— la mesure directe de T — S, ainsi que sa composition ionique. C'est le problème de l'*acidité d'échange* ;

— la référence à une valeur de T, qui soit vraiment représentative de l'état ionique du sol. C'est alors la question de l'évaluation de la *capacité d'échange du sol*.

Ce sont ces deux aspects qui vont être envisagés successivement.

III. — L'acidité d'échange. Sa mesure et sa composition

Le problème de l'origine de la nature acide du complexe d'altération a fait l'objet de nombreux travaux qu'il n'est pas dans notre intention de rappeler ici, leur analyse ayant déjà été réalisée dans quelques mises au point capitales (Jenny, 1961 ; Jackson, 1963 ; Coulter, 1969...). Mais la valeur de T — S a longtemps été attribuée, à la suite d'Hissink, aux *seuls* ions H^+. Ce n'est qu'à partir de 1932 sous l'impulsion de Riehm (1932), Paver et Marshall (1934), puis de Tchernov (1947-56), Gilly (1958), Yuan (1959), Blanchet *et al.* (1960) que la présence d'aluminium dans les extraits salins des sols, longtemps expliquée par des réactions *secondaires* avec les constituants minéraux, a été mise en relation avec la présence d'aluminium fixé en position d'échange sur les minéraux argileux. On a eu tendance ultérieurement à en faire le composant essentiel du complexe d'échange des sols acides et à minimiser complètement le rôle des protons échangeables. En fait, on sait aujourd'hui que protons H^+ et cations Al peuvent coexister, en sorte que l'acidité d'échange correspond bien à la somme des ions $H^+ + Al$ *échangeables*. Toute la question revient à évaluer correctement cette somme et à déterminer sa composition réelle, ce qui n'est pas sans poser des problèmes.

Avec les phénomènes consécutifs à une simple dissolution dans KCl de formes *non* échangeables de l'aluminium, surgit un premier problème. Les techniques d'extractions *successives* devraient permettre d'éviter cet écueil (Pratt et Bair, 1961 ; Skeen et Sumer, 1965 ; Sivasubramanlam et Talibudeen, 1972 ; Prakash et Bhasker, 1974) ; il en est de même lorsqu'on utilise la méthode de routine dont il a été question ci-dessus (Espiau et Peyronnel, 1976), qui conduit d'ailleurs à des résultats comparables.

Ceci supposé résolu, le problème de base qui reste à élucider est celui qui découle

de la nature même des ions aluminium en solution. En effet, étant un élément relativement acide (pK $\simeq$ 5, acide acétique pK = 4,8), l'aluminium n'existe sous l'aspect de cation simple hydraté $\{ Al(H_2O)_6 \}^{3+}$ que dans les milieux très acides. Dès que le pH s'élève, ces cations s'hydrolysent pour donner les formes *hydroxylées* monomères, tels $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, puis de formes polymères $Al_n(OH)_q^{(3n-q)+}$ qui sont de moins en moins mobiles, c'est-à-dire de moins en moins échangeables au fur et à mesure que n croît ; et ceci va de pair avec une évolution des minéraux argileux 2/1 par l'intermédiaire de leurs espaces interfoliaires (phénomène général de transformation).

Il résulte de cet état de choses, au moins trois conséquences importantes :

1) La *nature* des cations « aluminiques » (constitution et charge) ainsi que leur *échangeabilité* dépendent du pH du milieu ;

2) Les cations aluminium et les protons, qui constituent la fraction « acide » du complexe d'échange *inter-réagissent*, ce qui signifie que toute modification dans la forme des ions « aluminiques » a une répercussion sur la quantité de protons superficiels et *vice-versa* (1) ;

3) Enfin, les protons déplacés par KCl peuvent également réagir sur des formes non échangeables de l'aluminium.

Nous allons considérer successivement les trois aspects de cette question.

A. — *Problèmes liés à la nature et à la charge des cations « aluminiques »*

La première des conséquences, qui a trait à la nature des cations « aluminiques », pose immédiatement un problème d'ordre analytique : le plus important en effet n'est pas d'évaluer la teneur en aluminium échangeable, mais bien sa contribution exprimée en *équivalents*. Il s'agit donc de ne pas faire d'erreurs sur la charge correspondant aux diverses formes d'Al échangeables du complexe.

La meilleure façon *a priori* de déterminer cette fraction acide serait de procéder à une *titration acidimétrique*. Mais, ce type de dosage doit être effectué lentement et à l'abri du CO_2 atmosphérique, soit dans des conditions qui ne sont guère compatibles avec un travail de routine. En outre, comme le montre la figure 2, si la courbe de titrage d'un mélange ($Al^{3+} + H^+$) permet généralement de déterminer correctement les protons par son point d'inflexion (ou premier pic de la courbe dérivée), on voit qu'aucun point singulier ne correspond à l'équivalence stoechiométrique de l'aluminium. On observe en fait deux pics dérivés vers la fin de neutralisation, mais ni l'un ni l'autre n'a de correspondance stoechiométrique (cf. Vermeulen *et al.*, 1975, puis Stol *et al.*, 1976 qui ont donné une interprétation de ces faits). L'expérience montre alors que si l'on choisit le dernier pic comme repère de fin de titrage, l'erreur (par défaut) est de l'ordre de 5 à 10 p. 100 (d'après nos essais réalisés à partir d'une série de solutions synthétiques).

L'autre façon d'appréhender l'aluminium échangeable est de doser l'aluminium *total* présent dans l'extrait KCl N, quels que soient son état ionique et son origine. C'est ce que l'on fait habituellement par *colorimétrie* ou par *absorption atomique*. Ces deux méthodes conduisent effectivement à un dosage exact de l'aluminium, mais

---

(1) D'où la grande différence avec les cations de nature basique : Na, K... qui sont toujours *identiques* et, en même temps, *indépendants entre eux et vis-à-vis des protons*.

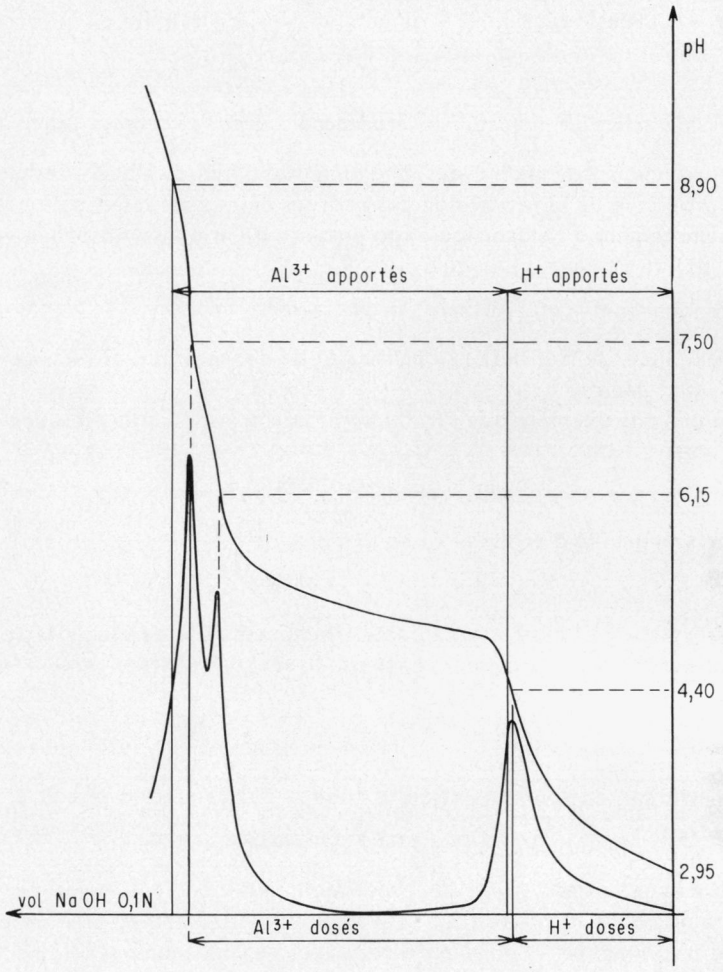


FIG. 2. — *Titrimétrie des protons et de l'aluminium sur une solution synthétique en milieu* KCl, N ; *courbe directe et courbe dérivée.*

Protons and aluminum titration in synthetic solution with KCl, N ; *direct and derivate curves.*

ne donnent en revanche aucune information sur la valence des cations engendrés par cet élément. Or, comme nous l'avons vu, le plus important n'est pas la teneur en aluminium, mais bien la contribution aluminique exprimée en équivalents. L'attribution de la valence 3 à l'aluminium par exemple n'est rigoureuse que dans la mesure où l'extrait renferme des protons échangeables, car la réaction :

$$Al^{3+} + H_2O \rightleftarrows Al(OH)^{2+} + H^+ \qquad (1)$$

est alors déplacée vers la gauche.

Selon les données fournies par Dalal (1975), une telle situation se produit lorsque le pH de l'extrait est inférieur ou au plus égal à 4, ce qui dans la pratique correspond à des extraits obtenus avec des sols dosant 0,2 méq. de protons par 100 g de terre.

Mais dès que le pH est supérieur à 4, on fait une erreur d'évaluation qui croît d'ailleurs en même temps que le pH (cf. tabl. 1 ci-après).

B. — *Interaction de l'aluminium échangeable avec les protons échangeables*

La deuxième conséquence des phénomènes d'hydroxylation-déshydroxylation a trait au problème de la répartition des charges entre protons et cations de l'aluminium. Simultanément à l'extraction et au passage de la phase adsorbée vers la solution, la possibilité d'une réaction du type :

$$Al(OH)^{2+} + H^+ \rightarrow Al^{3+} + H_2O \qquad (2)$$

conduit à envisager le transfert aux cations Al de charges qui, en fait, devraient être attribuées aux protons.

Supposons par exemple que l'état *adsorbé* corresponde à la présence des cations acides suivants :

$$xAl^{3+},\ zAl_n(OH)_p^{(3n-p)+},\ yH^+ .$$

Cela donne une acidité d'échange en équivalents de :

$$3x + z(3n - p) + y . \qquad (3)$$

Mais la désorption de l'aluminium lors du traitement KCl, en même temps que celle des protons éventuels du complexe, peut conduire à un réarrangement ionique à la suite d'une réaction telle que :

$$xAl^{3+} + zAl_n(OH)_p^{(3n-p)+} + yH^+ \rightarrow (x + nz)\ Al^{3+} + (y - zp)\ H^+ . \qquad (4)$$

L'acidité d'échange en solution est alors donnée par le second membre, soit :

$$3(x + nz) + (y - zp) . \qquad (5)$$

Or, les deux expressions { (3) et (5) } sont mathématiquement *égales*, ce qui signifie que le fait d'attribuer la valence 3 à tout l'aluminium extrait et dosé ne modifie pas en principe la somme ($H^+ + Al^{3+}$) *exprimée en équivalents*, même si cela ne correspond pas tout à fait à la situation réelle de la couche superficielle. On sait néanmoins, à la suite des travaux de Frink et Peech (1963), que la forme Al^{3+} représente l'état adsorbé le plus vraisemblable. En effet, à la suite d'une interprétation basée sur une distribution de Boltzmann de la couche diffuse, ces auteurs concluent que le degré d'hydrolyse des ions aluminium adsorbés par une montmorillonite et une hectorite est plus faible que le degré d'hydrolyse de l'aluminium dans une solution saline d'équilibre, lui-même plus faible que dans une solution aqueuse de même concentration en aluminium total.

Dans la réalité, l'égalité des deux expressions ci-dessus { (3) et (5) } ne peut s'obtenir que si $y > zp$, c'est-à-dire s'il persiste un excès appréciable de protons au sein de la solution d'extraction ou encore comme on l'a vu plus haut si le pH de l'extrait est inférieur ou au plus égal à 4. Le dosage colorimétrique ou par absorption atomique de l'aluminium et le dosage potentiométrique des protons en excès, permettent alors une appréciation *exacte* de l'acidité d'échange.

En revanche, si $y < zp$, une partie de l'aluminium échangeable reste à l'état hydroxylé et n'a plus la valence 3. Dans ce cas, l'erreur des déterminations précédentes

devrait s'accroître avec l'élévation du pH de l'extrait ; aussi la précision du dosage de l'acidité d'échange pourrait être meilleure en utilisant la titrimétrie.

On voit apparaître ainsi l'incidence que peut avoir un problème d'ordre purement analytique au niveau des phénomènes liés aux interactions entre cations Al et protons.

C. — *Action des protons échangeables sur l'aluminium non échangeable*

Dans le cas des sols acides, le traitement KCl extrait donc des aluminium échangeables en même temps que des protons et nous avons envisagé pour ceux-ci la possibilité de réagir sur les cations Al en solution et de modifier leur état ionique. Mais ils peuvent *aussi* réagir sur les phases solides de l'aluminium plus ou moins labiles des sols, qui constituent par exemple ce qu'on appelle « l'alumine libre ». De ce fait, une sorte de « dissolution » se produit qui correspond à la réaction ci-après :

$$Al_n(OH)_q^{(3n-q)+} + qH^+ \rightarrow nAl^{3+} + qH_2O\,.$$

Une telle réaction apporte donc en solution un excédent d'aluminium, qui n'est pas le reflet de l'aluminium échangeable et qui, d'un autre côté, fait disparaître des protons. Or, si on comptabilise cette nouvelle quantité d'aluminium avec l'acidité d'échange, celle-ci sera augmentée d'une valeur égale à 3 n dans le cas des dosages par colorimétrie ou par absorption atomique. Comme (3 n — q) est supérieur ou égal à zéro, nous obtenons 3 n $>$ q ; ce qui veut dire qu'à la disparition de q équivalents sous forme protonique correspond l'apparition d'une quantité 3 n équivalents d'ions Al^{3+} qui lui est égale ou supérieure. La différence envisagée est d'ailleurs encore accentuée, si l'aluminium passe en solution avant d'atteindre l'état d'ion trivalent et reste dans cet état par suite de la disparition des protons (l'aluminium peut être solubilisé avant d'atteindre la forme Al^{3+}).

Il y a tout lieu de penser qu'avant même que les protons ne réagissent sur l'aluminium non échangeable, la fraction échangeable se trouve dans l'extrait sous forme d'ion trivalent. Finalement, c'est une erreur par excès qui doit alors entacher le résultat de l'acidité d'échange.

Ce phénomène peut d'ailleurs être vérifié et provoqué expérimentalement en additionnant l'extractant KCl N d'une quantité connue de HCl, puis en comparant la « nouvelle acidité d'échange » à celle fournie par KCl *seul*: l'augmentation d'aluminium échangeable devrait être au moins égale sinon supérieure à la quantité de protons introduits sous forme de HCl, si les interactions sol-solution se limitaient à celles des protons sur l'aluminium non échangeable. C'est bien ce qui se passe dans la majorité des cas. Nous avons cependant trouvé des résultats inverses avec un horizon A_{11} d'un andosol et A_{11} d'un sol podzolique lessivé (données non publiées). On peut alors concevoir un phénomène de chimisorption des protons par certains « groupements actifs » à la surface des minéraux (ou de la matière organique). Amédée et Peech (1976), eux, envisagent un mécanisme inverse pour expliquer l'influence de la force ionique sur la dissolution de l'aluminium : il s'agirait de la dissociation de groupements OH à la surface des hydroxydes de fer et d'aluminium qui libérerait des protons ; il y aurait « fixation » de potassium, ainsi que formation de HCl responsable de la dissolution de $Al(OH)_3$.

Ces mécanismes à effets opposés ne s'excluent pas obligatoirement et ce n'est que la résultante globale qui peut être vérifiée lors des mesures.

Les résultats de Amédée et Peech posent toutefois le problème que nous avons évoqué au paragraphe II, celui du choix de la concentration des réactifs. Si l'on examine attentivement les courbes cumulatives qu'ils présentent, on peut remarquer d'une part que les solutions KCl N et 0,1 N donnent des courbes, soit qui tendent à se rapprocher, soit qui sont parallèles dès la cinquième ou sixième extraction, et d'autre part que si la solution normale extrait davantage d'aluminium, ce n'est qu'au cours du premier traitement. Aussi, peut-on penser que si l'aluminium supplémentaire est dû à l'action des protons, il s'agit de protons échangeables ou qui peuvent être considérés comme tels, parce que assez facilement dissociables ; mais il faut alors supposer que KCl 0,1 N n'est pas un extractant assez énergique.

Si l'on n'envisage pas d'action particulière des protons, on peut également en déduire que KCl 0,1 N n'est pas un réactif assez énergique pour extraire tout l'aluminium échangeable et l'on rejoint par là la position de Mac Lean (1965) qui conseille des concentrations élevées.

* * *

Cette analyse des différents mécanismes responsables de la disparition des protons échangeables, nous a permis une nouvelle fois de mettre l'accent sur les rapports étroits qui peuvent exister dans ce domaine entre les phénomènes tels qu'ils se présentent dans la réalité pédologique et les problèmes analytiques à partir desquels on doit nécessairement les appréhender. A ce niveau, la question relative à la précision des déterminations en fonction des méthodes utilisées devient donc importante à envisager.

TABLEAU 1

Appréciation de l'exactitude du dosage de l'acidité d'échange en fonction des données de Dalal et en l'absence d'interactions $H^+ \leftrightarrow Al$ non échangeable

Appreciation of accurary of exchange acidity versus Dalal data and without interaction $H^+ \leftrightarrow$ no exchangeable Al

pH de l'extrait KCl N		4,0	0,2 0,3	0,4 0,5	5,0
Présence ou absence protons échang.		H^+			
Ions aluminium échangeables		Al^{3+}	Al^{3+} $Al(OH)^{2+}$	Al^{3+} $Al(OH)^{2+}$ $Al(OH)_2^+$	$Al(OH)^{2+}$ $Al(OH)_2^+$ $Aln(OH)_q^{(3n-q)+}$
Ordre de précision des dosages	Potentiométrie → H^+ Colorimétrie ou absorpt. at. → Al	dosage précis ← →	Erreur < 10 p. 100	Erreur > 10 p. 100 → 50 p. 100	
	Potentiométrie H^+ et Al	Erreur relative comprise entre 5 et 10 p. 100 ← →			

Ainsi, si l'on s'en tient au cas où il y a absence d'interactions $H^+ \rightleftarrows$ Al non échangeable, il est tout à fait possible d'avoir une idée de la précision qui peut être obtenue pour chaque méthode et dans les diverses situations examinées. Le tableau 1 établi en fonction des résultats de Dalal (1965) rassemble dans cette optique les données acquises à ce jour. L'examen de ce tableau fait immédiatement apparaître que les techniques basées sur la colorimétrie et l'absorption atomique sont à proscrire dès que le pH de l'extrait est supérieur à 4,2. Cependant, la comparaison à diverses reprises entre les résultats des méthodes optiques et ceux de la titrimétrie, ne nous a pas révélé des écarts aussi importants que ceux que laisse prévoir ce schéma pour des $pH > 4{,}2$.

Les travaux de Vermeulen *et al.* (1976) tendent à montrer que le degré d'hydrolyse diminue avec la concentration. Or dès que le pH de l'extrait est supérieur à 4,2, le taux d'Al échangeable s'abaisse rapidement. Il faut d'ailleurs constater que l'extractant KCl N n'est pas un milieu aqueux simple. Sa forte concentration ionique doit favoriser les phénomènes de dissociation (Charlot et Tremillon, 1963). Cette remarque est à rapprocher des conclusions de Peech et Frinck déjà évoquées. Les courbes de Dalal établies d'après des données thermodynamiques valables pour des milieux aqueux *très dilués* conduisent probablement à un jugement trop sévère à l'égard des méthodes optiques.

Cette analyse nous a donc amené à mettre l'accent avant tout sur les phénomènes d'interaction aluminium-proton, tout en nous conduisant à entrevoir la possibilité de mécanismes supplémentaires qui engagent l'action des protons. En outre, dans la mesure où une fraction de la matière organique est soluble dans l'extrait KCl, celle-ci peut interférer dans le titrage des protons par l'intermédiaire des groupements carboxyliques de faible pK, tandis que ceux qui correspondent à un pK plus élevé contribuent à augmenter la valeur de l'aluminium. C'est ainsi que Delecour et Hanotiaux [1] préfèrent désigner par « acidité forte » et « acidité faible » les composants de l'acidité d'échange, plutôt que de parler de protons échangeables et d'aluminium échangeable. Il n'en demeure pas moins que ceux-ci restent les deux composants majeurs de ce paramètre.

* * *

En définitive, la valeur mesurée de l'acidité d'échange se présente comme la résultante de plusieurs phénomènes « additifs ». Cette détermination ne permet pas d'atteindre la description exacte de la garniture ionique des fractions actives du sol ; cependant, reposant sur une conception « systémique » du problème étudié, elle conduit à mieux appréhender la situation du complexe d'altération que celle découlant de l'utilisation des tests plus classiques tels que T et S.

IV. — Capacité d'échange des sols et son évaluation Cas particuliers des sols acides

En toute rigueur et de manière un peu abrupte, le paramètre qui nous intéresse ici est le nombre total de déficits de charge du sol qui, pour maintenir l'électroneutra-

(1) Communication personnelle.

lité du système tel qu'il existe, est compensé par des ions positifs à caractère échangeable et susceptibles de ce fait même d'être interchangeables. Ceux-ci peuvent être des ions de nature basique Na, K, Ca... et, dans le cas des sols acides, des cations de type acide (Al) et même des protons. Exprimé en milliéquivalents, ce déficit de charge globale à caractère « échangeable » s'écrit :

$$T = Na^{+} + K^{+} + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Al + H^{+} \qquad (7)$$

Al représentant l'ensemble de l'aluminium extrait qui est assimilé à de l'aluminium échangeable et que l'on considère généralement comme Al^{3+}.

Il est donc égal à la somme des cations basiques S et de l'acidité d'échange A telle qu'elle vient d'être définie.

En fait, l'origine de ce déficit de charge est multiple. Classiquement, on distingue :

a) les charges *permanentes*, qui sont indépendantes du pH et qui sont associées à des caractéristiques intrinsèques des constituants du sol, en particulier des argiles 2/1 (existence de substitutions isomorphiques) ;

b) les charges *variables* liées à la dissociation éventuelle de groupements OH des argiles ou des groupements fonctionnels de la matière organique (-COOH, -OH) qui se produit de plus en plus au fur et à mesure que le pH augmente à partir de pH 6. En étudiant l'origine, la nature et l'importance des constituants organiques ayant des propriétés d'échange, Mitchell signalait dès 1932, la difficulté de mesurer une valeur de référence pour la C. E. C., celle-ci dépendant toujours de la nature des extractions chimiques envisagées. De toute manière, la contribution de la matière organique à la capacité d'échange dépendant du pH est plus importante que celle des argiles (Helling *et al.*, 1964 ; Lefèbvre-Drouet, 1966).

Appartiennent également à cette classe les charges dites *accidentelles* qui peuvent être dues soit à des processus de chimisorption (Van Olphen, 1977), soit à des phénomènes de croissance ou de dissolution non congruente (Herbillon, 1974).

Or, les charges variables sont influencées par les différents facteurs énumérés au paragraphe II : pH, force ionique, constante diélectrique, nature de l'anion ; mais de tous les paramètres envisagés, c'est *probablement* le pH qui est prépondérant. En outre, les méthodes de routine utilisent généralement des solutions normales de sels de cations et d'anions monovalents ou de cations bivalents et d'anions monovalents. Lorsque l'on passe des unes aux autres, la *force ionique* ne varie que de 1 à 1,5. C'est pour ces raisons que nous ne prenons en compte par la suite que l'aspect pH.

Ainsi, le déficit de charge varie en fonction des conditions du milieu ; il n'a de sens que pour celles du sol en place, c'est-à-dire au même pH et pour un électrolyte identique ayant la même concentration. Et ceci est particulièrement vrai pour les sols acides dont la capacité d'échange liée aux charges permanentes n'est pas tout à fait une constante (comme dans le cas des sols neutres ou alcalins), du fait que la polymérisation des ions Al échangeables arrive dans certaines conditions à les immobiliser et à bloquer ainsi une partie des sites dits « permanents ». Ce phénomène de variation de la C.E.C. sous l'effet de la précipitation d'aluminium interfoliaire a été largement étudié dans les argiles et dans les sols (Rich, 1960 ; Coleman *et al.*, 1964 ; Volk et Jackson, 1963 ; Turner et Brydon, 1967 ; De Villers et Jackson, 1967). Selon Schwert-

mann et Jackson (1963), puis Violante et Violante (1973), la partie de la C.E.C. ainsi masquée pourrait se retrouver par titration (1).

Il arrive donc qu'une partie des sites permanents soit comptabilisée avec les charges variables dépendant du pH. Aussi certains auteurs préfèrent-ils se référer à une C.E.C. *effective* (cf. Kamprath et Welch, 1962), qui est égale à la somme des sites permanents du milieu diminuée de la quantité des sites bloqués par des hydroxypolymères alumineux :

$$T_{eff} = \text{CE permanent} - \text{sites bloqués} . \qquad (8)$$

En fait, par ses groupements acides fortement ionisés (faibles pK), la matière organique peut interférer ; Kamprath et Welch montrent à cet effet que 20 p. 100 environ de la C.E.C. de la matière organique est due à ces groupements.

En considérant les équations (7) et (8), on arrive en définitive à écrire :

$$T_{eff} = Na^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Al + H^+ = S + A . \qquad (9)$$

Tout le problème revient alors à mesurer T_{eff} dans les meilleures conditions.

— Les sels d'acide acétique sont d'un usage très courant et la méthode à l'acétate d'ammonium normal à pH 7 est quasi universelle. Mais, en fonction de ce qui a été dit plus haut, on arrive à des valeurs de T qui sont bien supérieures à la capacité d'échange réelle. Les données, qui ont été reportées dans la figure 1, montrent que cette méthode surestime toujours T dans le cas des sols acides.

— La méthode de Mehlich (1953) a souvent été préconisée. Elle opère avec $BaCl_2$ tamponné à pH 8,1 et certains auteurs la considèrent comme la seule technique valable pour déterminer la capacité *totale* d'échange cationique et l'acidité totale d'échange. Ceci est vrai, car elle englobe beaucoup de charges variables mais ne correspond pas du tout à la capacité d'échange réelle du sol en place, qui est nettement plus faible. Relativement valable pour les *sols calcaires*, elle perd donc toute signification dans le domaine de la pédogénèse acide.

— Il reste alors, entre autres, la méthode basée sur les sels neutres non tamponnés tels KCl N, qui nous permet d'extraire d'une part les cations basiques : Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} et d'autre part la fraction acide échangeable (acidité d'échange), c'est-à-dire les protons et les Al échangeables à l'exclusion des hydroxypolymères d'aluminium interfoliaires (2). C'est en quelque sorte la méthode de Coleman *et al.* (1959), mais en comptabilisant du même coup les protons échangeables négligés dans l'évaluation de ces auteurs. Or ceci correspond au second membre de l'équation (9). Il en résulte que la méthode au KCl est la plus appropriée à la détermination de la C.E.C. des sols acides { elle correspond à la mesure de « C.E.C. au pH du sol » de Guillemin *et al.* (1978) et Penel (1979)}.

---

(1) Les titrations sont effectuées en milieu KCl et en présence du sol. Ces auteurs repèrent trois paliers : ils attribuent les deux premiers aux protons et à l'aluminium échangeable et relient le troisième aux ions hydroxypolymères interfoliaires et non échangeables de l'aluminium. Le repérage de ces trois paliers ne semble possible qu'avec des échantillons d'horizons minéraux. Des titrages effectués avec des horizons A_1 et B_1 de sols ocres podzoliques ne nous ont fourni qu'une variation continue après l'amorce du deuxième palier. Nous l'interprétons comme la succession de groupements fonctionnels dont les valeurs des pK de dissociation sont trop rapprochées et il faut surtout voir dans ce phénomène l'effet de la matière organique. En outre, il y a peut être lieu de rapprocher ce troisième palier de celui qui apparaît dans la figure 2.

(2) Les cations Mn^{2+} et Fe^{2+} sont rarement pris en considération dans l'étude du complexe absorbant. Les résultats de Penel (1979) montrent que leur proportion est non négligeable. Les pK de la première réaction d'hydrolyse étant respectivement de 8,3 et 9,5 pour Fe^{2+} et Mn^{2+}, on ne peut pas considérer ces deux ions comme des cations acides.

L'essentiel des données relatives à ce problème est reporté dans la figure 3, qui, de ce fait, schématise les divers phénomènes affectant le complexe d'échange des sols. Elle met en relief la complexité des phénomènes et fait apparaître la difficulté, voire

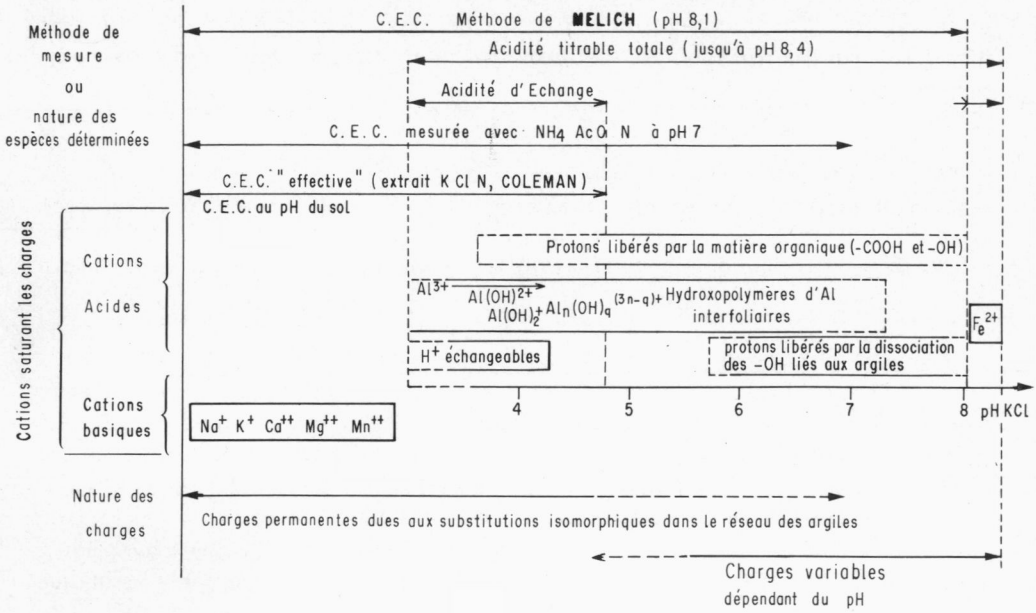


FIG. 3. — *Capacité d'échange cationique des sols acides ; origine des charges ; méthodes de détermination.* Fe^{2+}(pK = 8,3) a été placé en fin de série des cations acides en raison de la possibilité de le déterminer par titrimétrie vers pH 8,3-8,4 (Rouiller, communication personnelle ; Penel, 1979).

Cationic exchange capacity of acidic soils, origin of charges, methods of determinations. Fe^{2+}(pH = 8,3) was located in the end of acidic cations ser because of the possibility to titrate it at pH 8,3-8,4.

l'impossibilité qu'il y a à élaborer une méthodologie « simple » qui permette de les différencier complètement. Cela est d'autant plus vrai que l'on aborde le domaine des charges variables. Aussi, malgré quelques exemples d'utilisation, en particulier pour différencier les horizons B des sols podzoliques et des sols bruns (Clark *et al.*, 1966), l'interprétation de la C.E.C. dépendant du pH ne semble pas vouée à une application généralisée lors de l'étude des sols acides. Finalement, la *C.E.C « effective » demeure une caractéristique pour laquelle les déterminations sont moins sujettes à fluctuation.* Cependant, dans ligne de la C.E.C. dépendant du pH, la titrimétrie devrait susciter un nouvel intérêt, car en permettant de calculer et tracer les courbes de pouvoir tampon elle fournit des informations supplémentaires, qui paraissent assez significatives de certains constituants minéraux ou organiques des sols (Rouiller *et al.*, à paraître).

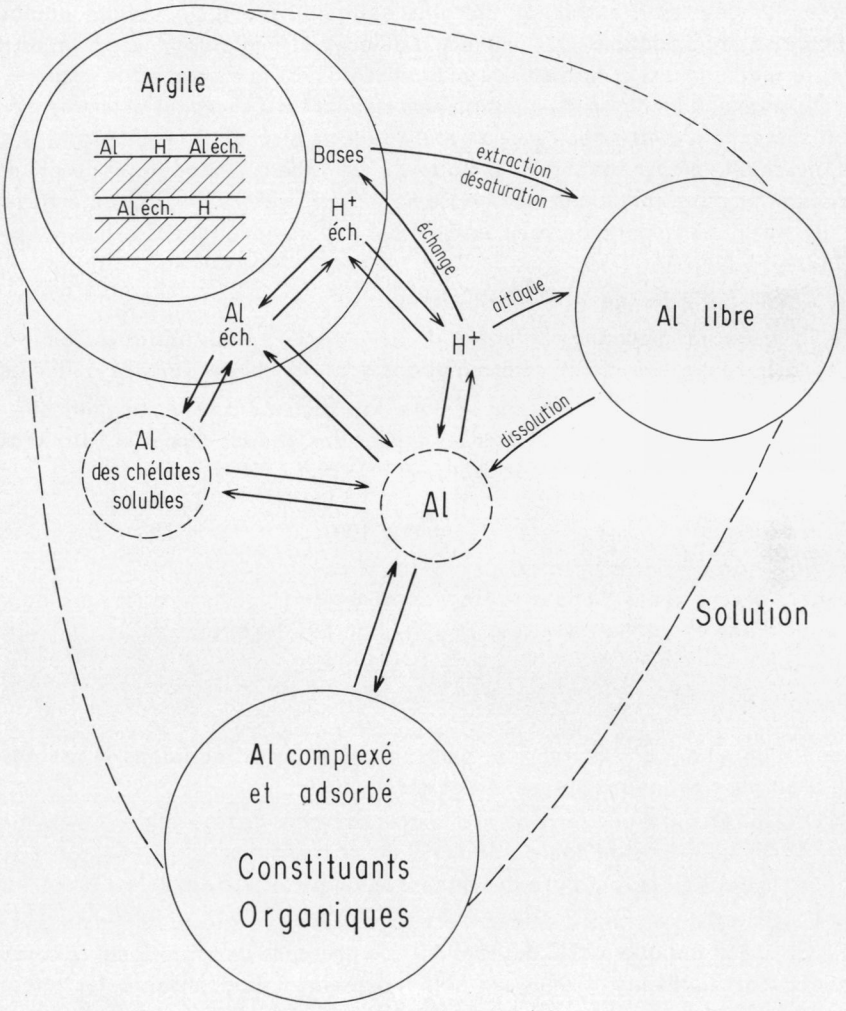
V. — Le taux d'acidité et ses relations avec les autres critères physicochimiques et cristallochimiques. Conséquences pédogénétiques

Dans le cas des sols acides, les phénomènes physicochimiques qui caractérisent les interfaces « minéraux, solution, composés organiques », sont comme on vient de le

voir extrêmement complexes, du fait qu'il existe une multitude d'interactions dont certaines sont très particulières.

On a ainsi, outre les réactions habituelles entre les ions de la solution et les ions du complexe d'échange :

— les réactions des ions du complexe d'échange entre eux ;



⇌ Réaction d'équilibre

Al correspond par simplification à $Al^{3+} \underset{H+}{\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}} AlOH^{2+} \underset{H+}{\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}} Al(OH)_2^{+} \underset{H+}{\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}} Aln(OH)q^{(3n-q)+}$

FIG. 4. — *Représentation de l'aluminium et des protons dans le système du complexe d'altération des sols acides.*

Representation of aluminum and protons in the weathering complex of acidic soils.

— les réactions entre les ions du complexe d'échange et la phase solide minérale (feuillets) ou organique ;

— les réactions entre les protons et certains oxydes libres...

Nous avons donc affaire à un véritable « système » (fig. 4) dans le sens habituel proposé par la théorie générale des systèmes, puisque toute modification d'un point entraîne des modifications à d'autres niveaux qui se répercutent ensuite sur lui. On comprend ainsi la difficulté de l'étude du complexe d'échange des sols acides, d'autant plus que toute extraction entraîne obligatoirement un certain nombre de modifications, modifications qui peuvent d'ailleurs être plus ou moins importantes suivant le réactif choisi et la méthode préconisée. C'est la raison pour laquelle nous avons été amenés à étudier cette question plus en détail et à chercher ainsi une méthode qui soit susceptible d'être appliquée *en routine* (donc aisément) et qui, dans le même temps, modifie le moins possible le complexe d'échange correspondant au pH du sol. L'extraction par une solution de sel neutre non tamponné (KCl N), qui a été évoquée ci-dessus, paraît de ce point de vue comme étant la plus adéquate. C'est ce qui permet d'atteindre :

— l'acidité d'échange $A = \sum Al + H^+$;

— la capacité d'échange effective : $T_{eff} = A + \sum$ cat. basiques, c'est-à-dire deux caractéristiques dont les déterminations sont les moins sujettes à fluctuation.

A partir de là, le paramètre qui semble non seulement le plus significatif, mais encore le plus précis pour caractériser les sols acides, semble être le « Taux d'acidité d'échange » tel qu'il a été utilisé par Espiau et Peyronnel (1977) :

$$A\,\% = \frac{A}{T_{eff}} \times 100$$

et qui met l'accent avant tout sur la fraction acide de la garniture ionique du sol. Il s'agit donc d'une évaluation *directe* d'un « taux de désaturation » :

$$\frac{(T - S)}{T} \times 100$$

ou mieux d'un « taux d'*insaturation* », puisqu'il n'est pas dit que dans le cas des sols acides, il ait pu y avoir une saturation originelle.

En effet, en étudiant une série de sols tempérés à pédogenèse acide, il a été montré (Espiau, 1978) qu'il existait toute une série de corrélations entre le taux d'acidité d'échange, le pH KCl et la nature des minéraux argileux 2/1 des sols :

— C'est ainsi qu'un taux d'acidité d'échange supérieur à 85 p. 100 va de pair avec un pH KCl < 4 et indique à côté des ions Al^{3+}, la présence de protons sur le complexe d'échange. Corrélativement, dans ces sols typiquement podzolisants, les minéraux argileux du complexe sont avant tout des smectites de transformation présentant des ions H^+ en position interfoliaire (cf. aussi Gjems, 1962 ; Brydon *et al.*, 1968 ; Souchier, 1971).

— A l'opposé, dès que le taux d'acidité d'échange tombe en dessous de 85 p. 100, le pH KCl devient supérieur à 4 et on note l'absence de protons dans les espaces interfoliaires où seuls les divers ions aluminiques sont représentés. De ce fait, les minéraux argileux caractéristiques sont des « intergrades alumineux » (vermiculite-

chlorite), c'est-à-dire des phyllites 2/1 dont les déficits de charges sont compensés avant tout par des ions hydroxyaluminium plus ou moins polymérisés, associés à de l'alumine libre (polymérisation extrafoliaire et indépendante).

On voit dans ces conditions que lorsque le type de pédogenèse est nettement marqué et que celui-ci a eu le temps de se développer, il y a « accord de phase » entre la nature des minéraux argileux et la composition de l'extrait KCl (pH et taux d'acidité d'échange).

Mais d'un autre côté, en application des conceptions géochimiques de Pédro (Pédro *et al.*, 1974) et à la suite d'une série de données expérimentales (Robert, 1971 ; Razzaghe-Karimi, 1976 ; Vicente, 1975 ; Robert et Veneau, 1977 ; Pelissonnier, 1978 ; Robert *et al.*, 1979), on sait aujourd'hui qu'il existe des relations de cause à effet entre les agents d'altération (nature et concentration des acides organiques) et les types de minéraux argileux engendrés.

— Ainsi des acides organiques complexants conduisent, lorsque la concentration n'est pas très élevée, à des smectites partiellement H^+ et ceci résulte du fait que l'aluminium est continuellement soutiré des espaces interfoliaires par complexation dans la solution du sol ; d'où la présence très nette de protons au sein du complexe d'échange. C'est le domaine de l'*acidocomplexolyse* qui conduit à la podzolisation franche (podzols et sols podzoliques).

— En revanche, dès que les acides sont peu complexants, l'évolution aboutit à l'individualisation d'intergrades alumineux, l'aluminium libéré étant immédiatement adsorbé par le complexe d'échange ; dans ce cas, les espaces interfoliaires sont essentiellement aluminiques. C'est alors le domaine de l'acidolyse, qui conduit à l'alumino-

TABLEAU 2

Acidité d'échange et pédogenèse
Exchange acidity and pedogenesis

Mécanisme mis en jeu			Acidocomplexolyse	Acidolyse
Caractéristiques physicochimiques du complexe d'échange	pH KCl en A/B		< 4	> 4
	Taux d'acidité d'échange en A/B nature des ions échangeables		> 85 p. 100 Présence de H^+ (et Al^{3+})	< 85 p. 100 Absence de protons Présence de divers ions aluminiques
Nature cristallochimique du complexe d'altération	Minéraux argileux en A/B		Smectites types	Intergrades alumineux Absence de smectites
	Eléments * libres (redistribution)	K_{Al}	> 2	< 2
		K_{Fe}	> 2,4	< 2,4
Type de pédogenèse			Podzolisation franche	Aluminosiallitisation Podzolisation modérée

* Indices de Souchier (1971).

siallitisation (Pédro, 1979) caractéristique de la podzolisation modérée ou cachée (sols brun ocreux, sols brun acides...).

Le tableau 2 résume ces différentes données et montre finalement qu'il suffit de se référer à un *test simple*, telle la mesure du *pH KCl*, pour différencier les deux grands types de pédogenèse associés à une évolution organique acide.

Naturellement, la vitesse des réactions induisant les évolutions physicochimiques du complexe est rapide à côté de celle des réactions qui sont à la base des évolutions cristallochimiques. Aussi les paramètres physicochimiques (pH KCl, taux d'acidité d'échange) sont-ils des indicateurs de choix de ce qui se passe *actuellement*, c'est-à-dire de la pédogenèse vivante. Si les critères cristallochimiques (minéraux argileux, Al libre, Fe libre) sont alors en harmonie avec les premiers, c'est que le type de pédogenèse enregistré a été *unique* depuis le début de l'évolution et en même temps que celle-ci dure depuis un certain temps. A l'opposé, s'il y a disharmonie, les critères cristallochimiques qui intègrent toutes les actions passées et surtout les plus accentuées, fournissent des indications sur la pédogenèse *antérieure* à l'évolution actuelle et, en définitive, sur l'histoire génétique du sol étudié.

En conclusion, la caractérisation physicochimique du complexe d'échange des sols acides comprenant la détermination du pH KCl et du taux d'acidité d'échange s'avère infiniment plus riche d'informations et en même temps beaucoup plus précise que celle basée sur la considération du taux de saturation ; elle seule permet en effet d'avoir des indications sur le fonctionnement pédogénétique « actuel » du sol. Certes, la méthodologie proposée ici n'est tout de même pas une panacée. Si elle a le mérite de fournir des résultats qu'il est en général possible de relier à la pédogenèse, nous avons vu que même sous climat tempéré certains sols peuvent poser encore quelques problèmes. Pour arriver à les résoudre, il semble qu'on devrait à l'avenir tenir compte davantage de la réactivité superficielle des minéraux. Mais la maîtrise de tels phénomènes implique nécessairement la mise au point au préalable d'une méthodologie très élaborée, à partir de laquelle on pourra par la suite tenter de revenir à des tests plus simples.

Proposé pour publication en Novembre 1979.

Summary

Characterization of the exchange complex of acid soils. The acid rate of exchange an its pedogenetic meaning under temperate climate

Once the questions raised by the physico-chemical characterization of acid soils well defined the analysis concerns the definition and meaning of the exchange acid rate. The main problem comes from the nature itself of the aluminium ions in solution. A certain number of experimental results allows to illustrate the resulting consequences but it appears that in some cases the protons-aluminium interactions alone cannot explain them. It implicates thus suplementary mechanisms which are not studied here.

The problems concerning the exchange capacity of acid soils are then studied with the present knowledge on permanent and variable loads which leads to stress the notion of actual C.E.C. A diagram sums up the main data acquired to-day and underlines the complexity of the phenomena.

In practice a mere treatment of soils with a neutral solution of salt (KCl N) makes it possible to determine the exchange acidity and the actual C.E.C. from which the acid rate of exchange can be easily calculated. In the study of the acid pedogenesis of the temperate areas this last parameter associated with pH KCl constitutes an excellent indicator of what occurs at present. However it appears still necessary of course to compare this type of physicochemical data with the usual crystallochemical

characterizations (argillaceous minerals-free oxides) ; it is as a matter of fact one of the only means to know if the faced pedogensis constitutes a simple extension or is a discontinuance as compared to the previous pedogenesis.

Zusammenfassung

Charakterisierung des austauschkomplexes des sauerboden der sauregrad des austausches und seine bodengenetische bedeutung unter gemassigten klimaverhaltnissen

Wenn die durch die physikalische und chemische Charakterisierung der Sauerböden gestellten Fragen einmal klar ausgedrückt worden sind, betrifft die Analyse die Bestimmung und Bedeutung des Austauschsäuregrades. Die Hauptfrage folgt aus der Natur selbst der sich in Lösung befindenden Aluminiumionen. Eine gewisse Zahl von Versuchsergebnissen ermöglichen es, die davon herkommenden Folgen zu illustrieren, aber es ist offensichtlich dass die Zwischenbeziehungen Aluminium-Proton allein in einigen Fällen nicht ausreichen, sie zu erklären. Es stellt dann zusätzliche Mechanismen in Frage, die hier nicht untersucht worden sind.

Die die Austauschkapazität der Sauerböden betreffenden Fragen sind dann auf Grundlage von den Kenntnissen über die ständigen und veränderlichen Ladungen untersucht, was zur Betonung des Begriffs von tatsächlicher K.A.K. führt. Ein Diagramm fasst die wesentlichen heute erworbenen Daten zusammen und lässt die Gegensätzlichkeit der Erscheinungen auftreten.

In der Praxis ermöglicht es eine einfache Bodenbehandlung mit einer neutralen Salzlösung (KCl N) den Austauschsaüregrad und die tatsächliche K.A.K. zu bestimmen, mit denen es leicht ist, den Austauschsaüregrad zu schätzen. In der Untersuchung der Sauerbodenertwichluz der gemässigten Zonen stellt dieser letzte Parameter mit pH KCl einen Wahlindikator für was gegenwärtig geschieht. Es ist doch immer nötig diese Art von physikalischen und chemischen Daten mit den gewöhnlichen kristallochemischen Bestimmungen zu vergleichen (Tonige Mineralien-freie Oxide) ; es ist tatsächlich eine der einzigen Art zu wissen ob die vorgesehene Bodenentwicklung eine einfache Fortsetzung ist oder ob sie eine Unterbrechung gegenüber der früheren Bodenentwicklung darstellt.

РЕЗЮМЕ

Определение обменного комплекса кислых почв.
Интенсивность обменной кислотности и её педогенетическое значение под умеренным климатом.
ЭСПИЁ П., ПЕДРО Ж.

После изложения проблем физико-химического определения кислых почв, авторы изучают определение и значение обменной кислотности. Основная проблема проистекает из самой природы алюминиевых ионов в растворе. Определённое количество опытных результатов служит примером следствий этой проблемы, но, в нескольких случаях, одни взаимодействия протонов и алюминия не позволяют дать отчёт в этом вопросе. В таких случаях принимают участие дополнительные механизмы, которых авторы не изучают в настоящей работе.

Далее рассматриваются проблемы обменной способности кислых почв с помощью познаний о постоянных нагрузках и переменных нагрузках, то что приводит к выдвижению понятия эффективной способности катионного обмена /СКО/. Схема представляет главные результаты и показывает сложность явлений.

На практике, простая обработка почв раствором средней соли /KCl И/ позволяет определить обменную кислотность и эффективную СКО, с помощью которых легко вычислить интенсивность обменной кислотности. В исследовании кислого педогенеза умеренных районов, последний параметр и pH KCl служат ценным показателем настоящих явлений. Однако, нужно сравнить такие физикохимические данные с обычными кристаллохимическими определениями /свободные окиси и глинистые минералы/ ; в самом деле, такое сравнение является одним из редких способов определения сущности исследованного педогенеза : или он продолжает предыдущий педогенез или он не имеет ничего общего с инм.

Références bibliographiques

AMÉDÉE, PEECH M., 1976. The significance of KCl extractable Al^{3+} as an index to lime requirements of soils of the humid tropics. *Soil Sci.* **121,** 227-233.

BLANCHET R., PERIGAUD S., NADEAU J. G., 1960. Acidité d'échange et aluminium libre ou échangeable des sols. *Ann. agron.* **11,** 621-650.

BRYDON J. E., KODAMA H., ROSS J. G., 1968. Mineralogy and weathering of the clays in orthic podzols and other podzolic soils in Canada. *9th Intern. Congr. Soil Sci.*, Adelaïde, 41-43.

CHARLOT G., TRÉMILLON B., 1963. *Les réactions chimiques dans les solvants et les sels fondus.* Monographies de chimie minérale, Gauthiers-Villars Ed., p. 8.

CLARK J. S., Mc KEAGUE J. A., NICHOL W. 1966. E., The use of pH- dependent cation-exchange capacity for characterizing the B horizons of brunsolic and podzolic soils. *Can. J. Soil Sci.* **46,** 161-166.

COLEMAN N. T., WEED S. B., Mc CRACKEN R. J., 1959. Cation-exchange capacity and exchangeable cation in Piedmont soils of North Carolina. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **23,** 146-149.

COLEMAN N. T., THOMAS G. W., LE ROUX F. M., BREDELL G., 1964. Salt exchangeable and titrable acidity in bentonite — sesquioxide mixture. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **28,** 35-37.

COULTER B. S., 1959. The chemistry of hydrogen and aluminium ions in soils, clays minerals and resins. *Soils Fertilizers* **32,** 215-223.

DAIKUHARA, 1908. Cf. H. JENNY (1961).

DALAL R. C., 1975. Hydrolysis products of solution and exchangeable aluminium in acidic soils. *Soil Sci.* **119,** 127-131.

ESPIAU P., PEYRONNEL A., 1976. L'acidité d'échange dans les sols : méthode de détermination de l'aluminium échangeable et des protons échangeables. *Science sol*, 161-175.

ESPIAU P., PEYRONNEL A., 1977. Acidité d'échange dans les sols : application à une séquence altitudinale des sols du Massif du Mont Aigoual. *Science sol*, 25-44.

ESPIAU P., 1978. Etude d'une série de sols de l'étage montagnard Corse. Contribution de la minéralogie des argiles et de l'acidité d'échange à l'interprétation de la pédogenèse. *Science sol*, 167-183.

FRINK C. R., PEECH M., 1963. Hydrolysis and Exchange Reactions of the Aluminium ion in hectorite and montmorillonite suspensions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **27,** 527-530.

GILLMAN G. P., 1979. A proposed method for the measurement of exchange properties of highly weathered soils. *Aust. J. Soil Research* **17,** 129-139.

GILLY G., 1958. Acidité et aluminium échangeable. *Ann. agron.* **9,** 679-691.

GJEMS O., 1963. A swelling dioctaedral clay mineral of vermiculite-smectite type in the weathering horizons of podzols. *Clay Min. Bull.*, 183-193.

GUILLEMIN M., ROUILLER J., BRUCKERT S., 1978. Relations entre groupes écologiques et propriétés physicochimiques des sols brunifiés des Vosges cristallines. *Ann. Sci. Forest.* **35,** 139-150.

HELLING C. S., CHESTERS G., COREY R. B., 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **28,** 517-520.

HERBILLON A. J., 1974. Modifications des propriétés des charges provoquées par l'altération chimique. Rôle du processus de désilicification. *Pédologie* **24,** 100-118.

HISSINK D. J., 1925. Base exchange in soils. *Trans. Far. Soc.*, 551-617.

JACKSON M. L., 1963. Aluminum bonding in soils : a unifying principle in soil science. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **27,** 1-10.

JENNY H., 1961. Reflections on the soil acidity merry-go-round. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **25,** 428-432.

KAMPRATH E. J., WELCH C. D., 1962. Retention and cation exchange properties of organic matter in Coastal Plain Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **26,** 263-265.

LEFÈBVRE-DROUET E., 1966. Bilan des cations échangeables en divers types de sols acides. *Ann. agron.* **17,** 553-570.

Mac LEAN E. O., 1965. Aluminum, in *Methods of soil analysis*, American Society of Agronomy, Inc., Publisher. Agronomy n° 9, part 2, chap. **67,** 978-997.

MEHLICH A., 1953. Rapid determination of cation and anion exchange properties and pH of soils. *J. Assoc. Offic. Agric. Chem.* **36,** 447-457.

MITCHELL J., 1932. The origine, nature and importance of soil organic constituents having base exchange properties. *J. Amer. Soc. Agron.* **24,** 256-275.

PARKS G. A., 1967. Aqueous surface chemistry of oxides and complex oxydes minerals : Isoelectric point and zero point of charge. *Adv. Chem. Ser.* **67** (*Ann. Chem. Soc.* Washington), 121-160.

PAVER H., MARSHALL C. E., 1934. The role of aluminum in the reactions of the clays. *Chem. Ind.* **12,** 750-760.

PÉDRO G., 1979. Les conditions de formation des constituants secondaires, in *Pédologie*, Tome II (M. Bonneau et B. Souchier, Ed.) Masson, Ch. IV, 58-72.

PÉDRO G., SCHERER S., 1974. Essai d'interprétation de la carte pédologique de France (Echelle 1/1 000 000). Caractérisation et répartition des principaux types de milieux pédogéochimiques. *Ann. agron.* **25,** 25-48.

PELISSONNIER Ch., 1978. *Quelques aspects de la pédogenèse à l'étage alpin. Etude minéralogique et morphologique.* D.E.A. fédéral Paris.

PENEL M., 1979. *Caractérisation physicochimique et classification des humus forestiers acides en relation avec la végétation et ses exigences écologiques.* Thèse de Spécialité en Pédologie. Université de Nancy I.

PRAKASH J. B. S., BHASKER T. D., 1974. Exchangeable aluminium and phosphorus sorption of some acid soils of Mysore state. *Soil Sci. Wal.* **118,** 243-246.

PRATT P. R., BAIR F. L., 1961. A comparison of three reagents for the extraction of aluminum. *Soil Sci.* **91,** 355-357.

RAZZAGHE-KARIMI M. H., 1976. *Contribution à l'étude expérimentale des phénomènes d'altération en milieu organique acide.* Thèse d'Etat Université P. et M. Curie, Paris VI.

RICH C. I., 1960. Aluminum in interlayers of vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **24,** 26-32.

ROBERT M., 1971. Etude expérimentale de l'évolution des micas. II. Les autres possibilités d'évolution des micas et leur place par rapport à la vermiculitisation. *Ann. agron.* **22,** 155-181.

ROBERT M., VENEAU G., 1977. Ion exchange and dissolution reactions in clay minerals in acidic conditions. Effect on the composition of the interlayer space. 3e *European Clay Conference.* Oslo, 160-162.

ROBERT M., RAZZAGHE-KARIMI M. H., VICENTE M. A., VENEAU G., 1979. Rôle du facteur biochimique dans l'altération des minéraux silicatés. *Séminaire AFES « Altération des roches », Science sol,* **2-3,** 153-174.

SCHWERTMANN U., JACKSON M. L., 1963. Hydrogen-aluminum clays. A third buffer range appearing in potentiometric titration. *Science* **139,** 1052-1054.

SIVASUBRAMANLAM S., TALIBUDEEN O., 1972. Potassium-aluminum exchange in acids soils. I kinetics. *J. Soil Sci.* **23,** 163-176.

SKEEN J. B., SUMNER M. E., 1965. Measurement of exchangeable aluminum in acid soils. *Nature* (London) **208,** p. 712.

SOUCHIER B., 1971. *Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard* (Vosges). Thèse d'Etat. Faculté des Sciences de Nancy Mémoire Serv. Carte Géol. Als. Lorr. no 33, 134 p.

STOL R. J., Van HELDEN A. K., DEBRUYN P. L., 1976. Hydrolysis. Precipitation studies of aluminium (III) solutions. 2 A kinetic study and model. *J. colloïd interface Sci.* **57,** 115-131.

TCHERNOV V. A., 1956. De la nature de l'acidité du sol. 6e *Cong. Intern. Sci. Sol.* Paris, vol. B, 547.

TURNER R. C., BRYDON J. E., 1967. Removal of interlayer aluminum from montmorillonite by seeding the suspension with gibbsite. *Soil Sci.* **104,** 332-335.

Van OLPHEN H., 1977. *An introduction to clay colloïd chimestry,* 2e Ed. John Willey and Son.

Van RAIJ, PEECH M., 1972. Electrochemical properties of some oxisoils and alsisoils of the tropics. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **36,** 587-593.

VERMEULEN A. C., GEUS J. W., DE BRUYN P. L., 1975. Hydrolysis-Précipitation studies of aluminum (III) solutions. I. Titration of acidified aluminum nitrate solutions. *J. colloïd interface Sci.* **51,** 449-458.

VICENTE-HERNANDEZ M. A., ROBERT M., 1975. Transformation profonde des micas sous l'action de l'acide galacturonique. Problème des smectites des podzols. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **281,** 523-526.

VILLIERS (De) J. M., JACKSON M. L., 1967*a*. Cation exchange capacity variation with pH in soil clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **31,** 473-476.

VILLIERS (De) J. M., JACKSON M. L., 1967*b*. Aluminous chlorite origin of pH dependent cation exchange capacity variations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **31,** 614-619.

VIOLANTE P., VIOLANTE A., 1973. La titolazione delle potenziometrica delle bentoniti insature-interpretazione del tezo tratto tamponato. *Ann. Fac. Sci. Agric. Portici* **7,** 112-119.

VOLK V. V., JACKSON M. L., 1963. Inorganic pH dependent cation exchange charge of soils. *Clays clay Miner.* **12,** 281-285.

YUAN T. L., 1959. Determination of exchangeable hydrogen in soils by a titration method. *Soil Sci.* **88,** 164-167.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 385-411.

Mise au point bibliographique
Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants
IV. — Conséquences des phénomènes d'adsorption

R. CALVET *, Martine TERCÉ * et J. C. ARVIEU **

* *Station de Science du Sol*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 Versailles

** *Station de Science du Sol*
Centre de Recherches agronomiques d'Antibes, I.N.R.A.,
06602 Antibes

Résumé

Les phénomènes d'adsorption-désorption ont une influence importante sur la dégradation, le transport et l'activité biocide des pesticides.

Les observations relatives à la dégradation sont souvent apparemment contradictoires car les effets de l'adsorption peuvent être très variables selon qu'il s'agit de transformations abiotiques ou biologiques. Dans le premier cas, l'adsorption accroît généralement la dégradation alors qu'elle la diminue dans le second. L'acidité de surface des argiles peut être à l'origine d'une dégradation des molécules adsorbées sur ces minéraux. La nature des cations échangeables et la teneur en eau sont des paramètres importants et les réactions de dégradation sont souvent plus marquées dans des systèmes déshydratés. Les colloïdes humiques sont également capables d'accroître la dégradation.

En déterminant en partie la concentration dans la solution du sol ou la pression partielle d'un pesticide, l'adsorption influence aussi les phénomènes de transport. Son introduction dans le formalisme des transferts n'est facile que dans les cas particuliers où les isothermes d'adsorption sont linéaires, l'équilibre d'adsorption instantané et où il n'y a pas d'hystérésis. D'une façon générale, l'adsorption diminue les déplacements des pesticides. Cependant, il existe peu de descriptions approfondies de cet effet car les données sur les cinétiques d'adsorption et sur l'hystérésis sont très insuffisantes.

Plusieurs observations montrent que l'adsorption peut diminuer l'activité biocide des pesticides. Cet effet n'est décrit que qualitativement car il n'existe pas d'informations permettant de faire une description quantitative de la relation entre l'activité biocide et l'adsorption. Ce phénomène a aussi des conséquences pratiques sur les doses d'emploi, la persistance et les possibilités d'extraction des résidus contenus dans les sols.

Par suite de l'adsorption, des molécules de pesticides sont retenues sur la surface des colloïdes minéraux et organiques. Elles se trouvent dans des conditions physico-chimiques particulières qui sont celles de l'état adsorbé et acquièrent alors un comportement différent des molécules en solution. Elles peuvent en effet subir des transformations chimiques et doivent être en général désorbées pour être absorbées ou transportées. Les phénomènes d'adsorption et de désorption contrôlent la concentration de la solution du sol, soit totalement, soit partiellement selon l'importance des phénomènes de dissolution et de cristallisation. Il en résulte plusieurs conséquences sur les phéno-

mènes de transport et de dégradation des pesticides ainsi que sur leur activité biologique. Les modifications de leur comportement liées à l'adsorption ont à leur tour des conséquences agronomiques concernant notamment leur utilisation.

I. — Conséquences des phénomènes d'adsorption sur le comportement des pesticides

A. — *Adsorption et dégradation*

La dégradation d'un pesticide dans le sol peut se faire selon deux voies. L'une est abiotique et concerne des réactions chimiques se développant dans la solution du sol ou sur la surface des colloïdes. L'autre est biologique et provient essentiellement de l'activité de la microflore. L'effet de l'adsorption est alors très variable selon l'origine de la dégradation, ce qui explique l'existence de résultats expérimentaux apparemment contradictoires.

1. *Observations sur des sols mettant en évidence le rôle possible des phénomènes d'adsorption.*

Etudiant la dégradation de l'atrazine dans des sols stérilisés et conditionnés dans des colonnes ou en suspension, Armstrong *et al.* (1967) et Armstrong et Chester (1968) ont observé que l'hydrolyse de la molécule herbicide était reliée à l'acidité du milieu et à l'adsorption. Quand celle-ci augmente, la dégradation augmente aussi. Des observations allant dans le même sens ont été faites pour l'asulam (Babiker et Duncan, 1977), le diazinon (Konrad *et al.*, 1967) et le malathion (Konrad *et al.*, 1969). Dans ces situations, la dégradation abiotique est supposée intervenir d'une façon dominante. D'autres travaux, cependant, ne semblent pas montrer que l'adsorption ait un rôle déterminant. C'est le cas notamment d'une étude de la dégradation de plusieurs herbicides à 95 °C qui ne fait ressortir que l'importance du rapport quantité de sol/quantité d'herbicide (Hance, 1969). Certains auteurs ont par ailleurs pu relier l'aptitude à la dégradation d'un sol à la présence d'un constituant bien déterminé. Ainsi, selon Yaron (1975), les sols renfermant de la kaolinite dégradent plus rapidement le parathion. Il s'agit ici d'une action spécifique de cette argile puisque les sols étudiés se classent de la façon suivante :

sols à kaolinite > sols à montmorillonite > sols riches en matière organiques, c'est-à-dire dans l'ordre inverse de l'affinité de ces adsorbants pour le parathion.

TABLEAU 1

Effet de l'addition de matériaux adsorbants sur le temps de demie-vie (en jours) *de trois herbicides* (Moyer *et al.*, 1972)
Effect of the addition of adsorbant materials on the half life (in days) *of three herbicides*

	Atrazine	Chlorthiamide	Linuron
Sol	71	57	78
Sol + 2,5 p. 100 de charbon ..	355	383	76
Sol + 10 p. 100 d'argile	98	61	92

Quand l'activité des microorganismes n'est pas supprimée, l'adsorption peut entraîner une diminution de la vitesse de dégradation. Le tableau 1 donne les temps de demi-vie ($t_{1/2}$) de trois herbicides dans des sols additionnés de charbon ou d'argile ($t_{1/2}$ = temps nécessaire à la dégradation de la moitié de la quantité de pesticide apportée). Il apparaît très nettement que les adsorbants ont un effet sur la dégradation, particulièrement l'adsorbant organique. Le tableau 2 montre aussi que des

TABLEAU 2

Valeurs du temps de demi-vie (en semaines) *de plusieurs insecticides dans deux types de sols* (Williams, 1975)

Half life (in weeks) *of several insecticides in two types of soils*

	Fonofos	Chlorvenvinphos	Chlormephos	Diazinon
Limon sableux	11	10	5	< 3
Tourbe	22	18	11	5

$t_{1/2}$ en semaines (Williams, 1975).

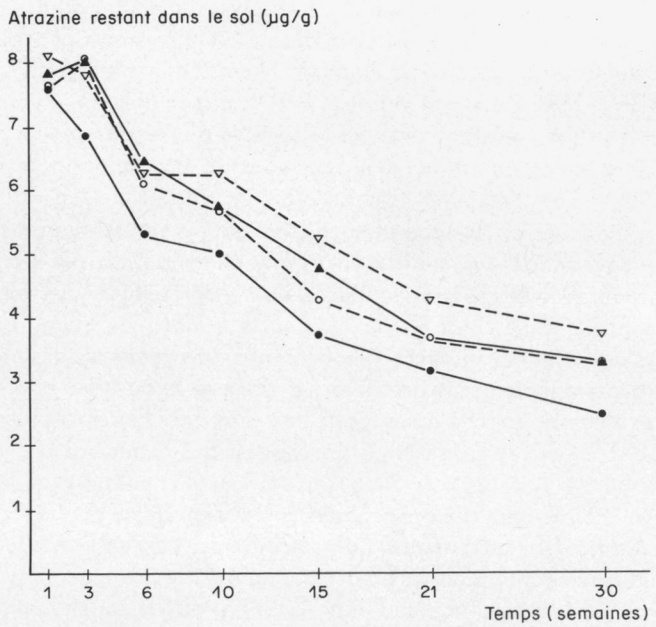


FIG. 1. — *Cinétiques de dégradation de l'atrazine dans les sols possédant différentes teneurs en argile* (Soulas, 1975). Teneurs en argile : —● 15 p. 100 ; — — ○ 25 p. 100 ; —▲ 35 p. 100 ; — — ▽ 45 p. 100.

Kinetics of degradation of atrazine in soils containing various clay contents.
Clay contents : —● 15 p. 100 ; — — ○ 25 p. 100 ; —▲ 35 p. 100 ; — — ▽ 45 p. 100.

molécules organo-phosphorées se dégradent moins rapidement dans une tourbe que dans un limon sableux. Dans certains cas, des effets dépressifs dus aux colloïdes argileux ont pu être observés comme le montrent les cinétiques de dégradation de l'atrazine dans des sols contenant des quantités variables d'argile (fig. 1).

Quand les observations sont faites sur des sols, l'interprétation n'est pas toujours facile et généralement aucun mécanisme ne peut être dégagé. C'est pourquoi d'assez nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la dégradation en présence de constituants du sol isolés.

2. *Dégradation et adsorption sur des constituants du sol isolés.*

a) *Dégradation et adsorption par les argiles.*

Deux raisons font que l'étude de la dégradation des pesticides adsorbés sur les argiles est intéressante : d'une part, la surface de ces minéraux présente des propriétés catalytiques importantes et ils sont fréquemment utilisés comme agent de formulation d'autre part. Un certain nombre de travaux ont en effet montré que des molécules organiques adsorbées pouvaient subir des transformations chimiques catalysées par la surface des argiles (Chaussidon et Calvet, 1975). Les mécanismes décrits font intervenir des transferts d'électrons ou de protons. Pour les pesticides, les exemples connus ne concernent que ces derniers dont l'origine peut être des protons échangeables ou des protons provenant de la dissociation de l'eau ou d'autres molécules organiques. Les réactions chimiques identifiées sont des hydrolyses affectant différents composés : les insecticides organo-chlorés (Fowkes *et al.*, 1960) et organo-phosphorés (Rosenfield et Van Valkenburg, 1965) et les triazines (Armstrong *et al.*, 1967 ; Russel *et al.*, 1968 ; Cruz *et al.*, 1968 ; Brown et White, 1969). L'importance de l'hydrolyse dépend de la nature des cations échangeables, et la surface d'une montmorillonite est beaucoup plus active que celle de minéraux amorphes du type allophane (Skipper *et al.*, 1978).

Le rôle de l'acidité de surface apparaît nettement sur la figure 2. Quand elle augmente, la dégradation des molécules organo-chlorés s'accroît. Lorsque l'acidité est supprimée par neutralisation avec l'urée ou l'hexaméthylènetétramine, l'activité catalytique disparaît. Celle-ci est par ailleurs surtout marquée quand les argiles sont sèches (séchées à 90-110 °C) et décroît en présence de vapeur d'eau. La dégradation des pesticides organophosphorés au contact d'une argile du type kaolinite a également fait l'objet d'études approfondies (Saltzman *et al.*, 1974 et 1976 ; Mingelgrin *et al.*, 1977). Bien que le mécanisme de cette action ne soit pas entièrement élucidé, il apparaît qu'à la suite de l'adsorption du pesticide, l'argile catalyse sa décomposition hydrolytique, le groupement alkylphosphate demeurant adsorbé. La figure 3 montre le rôle de l'eau adsorbée sur l'argile. Contrairement à ce que l'on pourrait attendre en considérant seulement le pouvoir polarisant du cation, il apparaît qu'une kaolinite Ca ou Na est plus efficace qu'une kaolinite Al. Enfin, ce fait est en contradiction avec d'autres résultats selon lesquels la vitesse de dégradation est en général plus grande quand les cations compensateurs sont Al^{+3} ou H^{+} (Fowkes *et al.*, 1960 ; Helling *et al.*, 1971).

L'hydrolyse des triazines adsorbées sur les argiles a également été très étudiée. Elle est bien mise en évidence par la spectroscopie d'absorption infrarouge (fig. 4) :

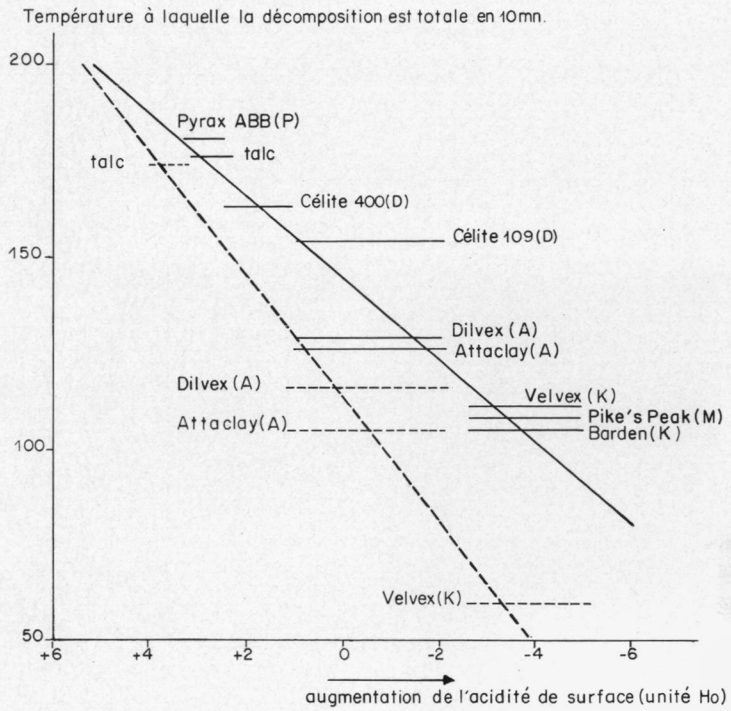


FIG. 2. — *Relations entre la décomposition de pesticides organo-chlorés et l'acidité de surface* (Fowkes *et al.*, 1960).
P = pyrophyllite ; M = montmorillonite ; D = diatomite ; K = kaolinite ; A = attapulgite ; - - - - endrin ; —— dieldrin.
Relation between the decomposition of organo-chloride pesticides and the surface acidity.

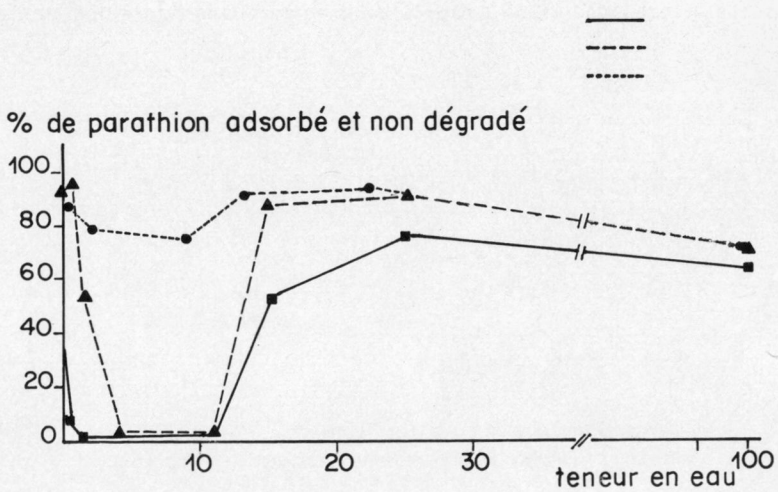


FIG. 3. — *Variation de la dégradation du parathion en fonction de la teneur en eau de l'argile* (Saltzman *et al.*, 1976).
—— Kaolinite Ca ; - - - - kaolinite Na ; .... kaolinite Al.
Variation of the degradation of parathion against the clay water content.

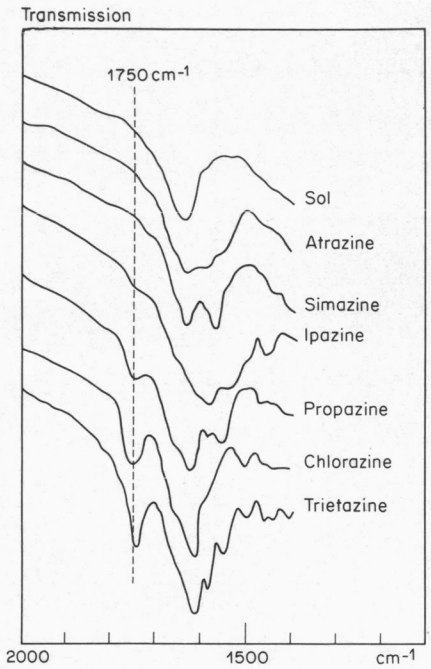


FIG. 4. — *Spectre d'absorption infrarouge de plusieurs triazines adsorbées sur un sol* (Russel *et al.*, 1968).
Infrared spectra of triazine molecules adsorbed by a soil.

la bande d'absorption localisée vers 1 750 cm^{-1} est en effet attribuée aux vibrations du groupe carbonyl de la forme cétonique de l'hydroxyatrazine (Russel *et al.*, 1968). Le schéma de dégradation proposé est donné dans la figure 5. Comme précé-

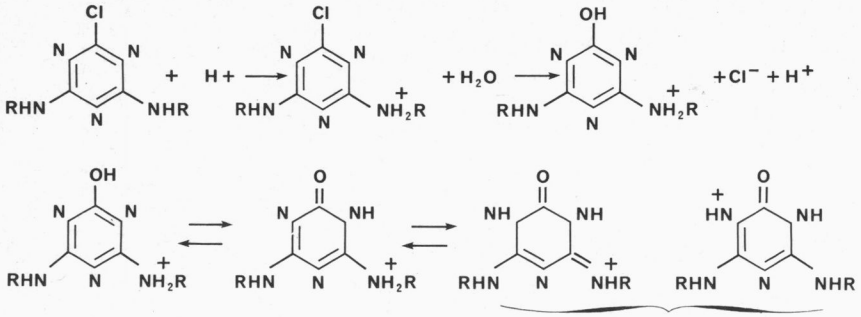


FIG. 5. — *Réactions proposées pour décrire l'hydrolyse de l'atrazine* (Russel *et al.*, 1968).
Proposed reactions for the description of atrazine hydrolysis.

demment, les résultats expérimentaux montrent que l'hydrolyse est beaucoup plus rapide dans des systèmes déshydratés. Ceux-ci sont réalisés soit par contact entre une argile séchée et une solution chloroformique (Brown et White, 1969 ; Cruz *et al.*,

1968), soit par déshydratation de l'argile après adsorption de l'herbicide (Tercé *et al.*, 1977 ; Skipper *et al.*, 1978).

b) *Dégradation et adsorption par les matières organiques.*

Plusieurs travaux ont très nettement mis en évidence les propriétés catalytiques des colloïdes humiques. Quand ils sont ajoutés à une solution de triazine ils diminuent considérablement le temps de demi-vie. Le tableau 3 en donne une illustration.

TABLEAU 3

Effet des acides humiques sur les caractéristiques de la dégradation de l'atrazine (Li et Felbeck, 1972)
Effect of humic acids on the degradation characteristics of atrazine

Milieu	$t_{1/2}$ atrazine en jours	Energie d'activation kcal $mole^{-1}$
Solution pH = 4.....	244	20,24
Suspension acide humique = 0,2 g/l pH = 4	1,73	18,56

Il importe de noter la diminution de l'énergie d'activation due à la présence d'acides humiques dans le milieu. Une autre indication sur le rôle de l'acidité de surface est fournie par les résultats de Nearpass (1972). Ils montrent en effet que l'accroissement du temps de demi-vie de la propazine consécutif à une diminution de l'acidité est plus faible en présence de matière organique (tabl. 4).

TABLEAU 4

Effet de la matière organique et du pH sur le temps de demi-vie ($t_{1/2}$) *de la propazine* (Nearpass, 1972)
Effet of organic matter and pH on the half life ($t_{1/2}$) *of the propazine*

Saturation du sol en Ca p. 100 ...	0	25	50	75	100
pH de la solution	2,94	3,69	4,56	5,44	7,20
$t_{1/2}$ suspension matière organique (jours)	17	42	98	**	***
$t_{1/2}$ * calculé pour une solution (jours)	34	93	302	1 000	11 000

* : $t_{1/2}$ calculé à partir de $t_{1/2} = f(pH)$.
** : 67 p. 100 de la propazine restent après 98 jours.
*** : 76 p. 100 de la propazine restent après 98 jours.

Comme pour les argiles, le mécanisme invoqué pour expliquer ces observations repose sur l'existence d'une hydrolyse acide due à l'acidité de surface des colloïdes, essentiellement due aux groupements carboxyliques (Armstrong et Chester, 1968).

3. *Le rôle de l'adsorption dans les phénomènes de dégradation.*

Il existe très peu d'informations sur l'effet de l'adsorption sur la photo-décomposition. Pour le paraquat, l'adsorption par une montmorillonite entraîne une diminution

de la dégradation, alors que l'adsorption sur des feuilles de végétaux augmente le nombre de molécules dégradées (Hance, 1970). Pour cette molécule l'adsorption s'accompagne d'un effet bathochrome (tabl. 4, Ire partie) qui pourrait favoriser la dégradation photochimique. Ce n'est pas le cas pour la montmorillonite en raison probablement de la position interfoliaire des molécules de paraquat adsorbées.

Les transformations chimiques sur les surfaces des colloïdes sont favorisées par l'adsorption. Ce phénomène, de ce point de vue peut donc augmenter la dégradation.

Les faits sont beaucoup plus confus en ce qui concerne la dégradation d'origine microbienne et des explications sont plus difficiles à donner. Les résultats expérimentaux sont généralement interprétés sur la base des considérations suivantes :

— le nombre de microorganismes serait plus élevé au voisinage des particules colloïdales, ce qui entraînerait une augmentation de la dégradation par suite de l'adsorption ;

— les exoenzymes responsables de réactions de dégradation seraient inactivés par l'adsorption ;

— l'adsorption entraînant une diminution de la concentration, provoquerait une diminution de l'absorption par les microorganismes. Cet effet, comme le précédent, pourrait être à l'origine d'une diminution de la dégradation.

Nous voyons donc qu'il n'est pas facile de prévoir quel peut être l'effet de l'adsorption dans un sol. Une prévision basée sur la composition du sol est encore plus difficile. La teneur en argile granulométrique est insuffisante puisqu'elle ne renseigne pas sur l'activité des surfaces. La teneur en matière organique l'est tout autant car ce constituant a deux effets opposés :

TABLEAU 5

Exemples de différents effets de la matière organique sur la dégradation de plusieurs pesticides (Hance, 1970)
Examples of various effects of organic matter on pesticides degradation

Pesticide	Effet sur la dégradation attribué à la matière organique	Cause
Monuron TCA Chlorprophame Naptalame 2,4-D	Augmentation	Augmentation de l'activité microbienne
Monuron Linuron Diphénamide	Augmentation	—
Piclorame	Diminution	Adsorption
Chloroxuron	—	—
Atrazine	—	—
Diuron	—	—
Paraquat	—	—
Dalapon Linuron	Effet nul	

— l'un positif par son action sur l'activité microbienne et ses propriétés catalytiques,

— l'autre négatif en raison de l'adsorption.

Le tableau 5 donne quelques exemples illustrant cette situation.

B. — *Adsorption et phénomènes de transport*

Les molécules adsorbées possèdent un coefficient de diffusion moléculaire assez faible (Scott *et al.*, 1974) et ne donnent donc pas lieu à un transport de masse important. Dans ces conditions, les déplacements des pesticides dans les sols sont essentiellement dus aux molécules en solution ou existant dans la phase vapeur pour les produits gazeux ou les produits liquides ou solides possédant une tension de vapeur élevée. Le transport de masse dans la phase liquide dépend de la concentration dans la solution et le transport dans la phase gazeuse dépend de la pression partielle dans la phase gazeuse. Cette concentration et cette pression dépendent à leur tour de l'adsorption qui conditionnent ainsi directement l'importance des phénomènes de transport.

1. *Rappel de quelques données théoriques.*

Bien que les phénomènes de transport puissent faire l'objet d'une description générale, il nous semble utile de traiter séparément la diffusion moléculaire et le transport par convection.

a) *Diffusion moléculaire et adsorption.*

Une mesure de diffusion moléculaire sur un échantillon de sol conduit à la détermination d'un coefficient apparent D_a qui tient compte :

- des mouvements moléculaires dans la phase liquide et gazeuse et dans la phase adsorbée,
- de la géométrie de chacune des phases, exprimée par la tortuosité,
- des phénomènes d'adsorption et de désorption,
- d'éventuelles transformations chimiques ou changements de phase.

D_a est donc une fonction de plusieurs variables et ne possède pas toujours d'expression analytique. Des développements complets peuvent être trouvés dans plusieurs ouvrages (ex. : Crank, 1975 ; Jost, 1960). Dans le cas où l'adsorption est caractérisée par un équilibre instantané et une isotherme linéaire, et, pour un milieu saturé en eau, D_a a pour expression :

$$D_a = \frac{D_1 \tau_1 \theta}{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \rho K_f}$$

où :

D_1 : coefficient de diffusion dans la phase liquide,

τ_1 : tortuosité de la phase liquide,

θ : teneur en eau,

ε : porosité,

ρ : masse spécifique,

K_f : coefficient d'adsorption.

Dans le cas d'une isotherme non linéaire, D_a est une fonction de la concentration. D'une façon générale cependant, le coefficient apparent de diffusion moléculaire décroît quand l'adsorption augmente.

La diffusion en phase gazeuse intervient seule, en général, pour les pesticides gazeux, car elle est environ dix mille fois plus importante que la diffusion en phase liquide. Le coefficient apparent D_a doit toutefois tenir compte des phénomènes de dissolution et d'adsorption. Quand dissolution, évaporation, adsorption et désorption sont instantanées et que l'isotherme d'adsorption est linéaire, D_a s'écrit

$$D_a = \frac{\varepsilon_g . \tau_g . D_g}{\varepsilon_g + \varepsilon_l K (l/g) + d_a K (s/l) K (l/g)}$$

avec :

D_g : coefficient de diffusion dans l'air,
τ_g : tortuosité correspondant à la phase gazeuse,
ε_g : porosité du sol occupée par de l'air,
ε_l : porosité du sol occupée par de l'eau,
K (l/g) : coefficient de partage du pesticide gazeux entre la phase liquide et la phase gazeuse,
K (s/l) : coefficient de partage du pesticide gazeux entre le solide et le liquide,
d_a : densité apparente du sol.

b) *Transport par convection et adsorption.*

α) *Description générale.*

Quand une solution se déplace dans un milieux poreux, plusieurs phénomènes prennent place simultanément (fig. 6) :

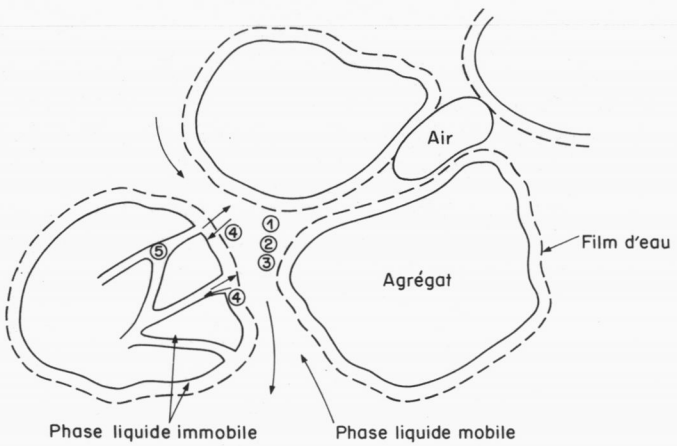


FIG. 6. — *Localisation des différents phénomènes contribuant au transport d'un pesticide dans le sol* (voir le texte).
Localisation of the different kinds of transport phenomena in the soil (see the text).

— Dans les pores de grandes dimensions, siège d'un écoulement (pores inter-agrégats, fissures...) :

- transport par convection (1) et diffusion moléculaire (2),

- dispersion hydrodynamique (3),
- échange de soluté entre la phase liquide mobile et les films d'eau au contact de la phase solide (4).

— Dans les pores de petites dimensions où l'eau ne s'écoule pas (pores intra-agrégat et films d'eau au contact de la phase solide) :

- diffusion moléculaire (5),
- échange avec la phase liquide immobile (4),
- adsorption et désorption.

L'équation générale décrivant le transport dans le sol est compliquée et ses solutions le sont aussi. Leur exposé et leur discussion ne sont pas du ressort de cette mise au point et pourront être trouvés par ailleurs (de Wiest, 1969 ; Fried et Combarnoux, 1971 ; Calvet et Graffin, 1975 ; Van Genuchten et Wierrenga, 1976).

β) *Modélisation des phénomènes de transport.*

L'introduction de l'adsorption dans un modèle mathématique décrivant le transport nécessite la connaissance de trois informations :

— la nature de l'isotherme d'adsorption, linéaire ou non linéaire et dans ce cas son expression analytique,

— la nature de l'isotherme de désorption pour éventuellement tenir compte de l'hystérésis,

— les cinétiques d'adsorption et de désorption.

Les équations relatives au transport d'un soluté sont d'autant plus compliquées que la description du transport est complète. Les formulations mathématiques correspondantes peuvent être trouvées dans différentes publications dont les principales sont rassemblées dans le tableau 6.

TABLEAU 6

Caractéristiques de l'adsorption utilisées dans certaines descriptions des phénomènes de transport
Adsorption characteristics used in some descriptions of transport phenomena

Auteurs	Cinétique		Isotherme d'adsorption		Hystérésis
	Eq. inst. *	Eq. n. inst. *	Linéaire	N. linéaire	
Kay, Elrick, 1967	×			×	
Lindstrom *et al.*, 1971	×	×	×		
Sung Ho Lai, Jurinak, 1972 ..	×			×	
Davidson, Chang, 1972	×		×		
Davidson, McDougal, 1973 ...		×	×		
Hornsby, Davidson, 1973	×	×	×	×	×
Van Genuchten *et al.*, 1974 ...	×	×	×	×	×
Villermaux, 1974		×	×		
Davidson *et al.*, 1975	×			×	×
Leistra, Dekkers, 1976	×	×	×		
Wierenga, 1977	×	×	×	×	×

* Equilibre instantané et non instantané.

2. *Résultats concernant l'influence de l'adsorption sur les phénomènes de transport.*

a) *Effet des différentes caractéristiques de l'adsorption.*

L'influence de l'adsorption sur le transport des pesticides apparaît très nettement dans de nombreux résultats expérimentaux (Harris, 1966 ; Call, 1957 ; Lambert *et al.*, 1965 ; Goring *et al.*, 1966 ; Leistra, 1971 ; Mac Kenry et Thomason, 1974 ; Wu *et al.*, 1975 ; Grover, 1977).

L'adsorption a un effet limitant quelle que soit la nature du transport. Pour la diffusion moléculaire, l'expression de D_a donnée précédemment peut être simplifiée et s'écrit de la façon suivante :

$$D_a \simeq \frac{D_1 \tau_1 \theta}{(1 - \varepsilon) \rho K_f} \quad \text{si } K_f \text{ est assez grand } (> 10)$$

d'où

$$\log D_a = \text{fonction linéaire de } \log K_f .$$

En effectuant des mesures sur une série de sols, Walker et Crawford (1970) ont effectivement observé une telle relation (fig. 7).

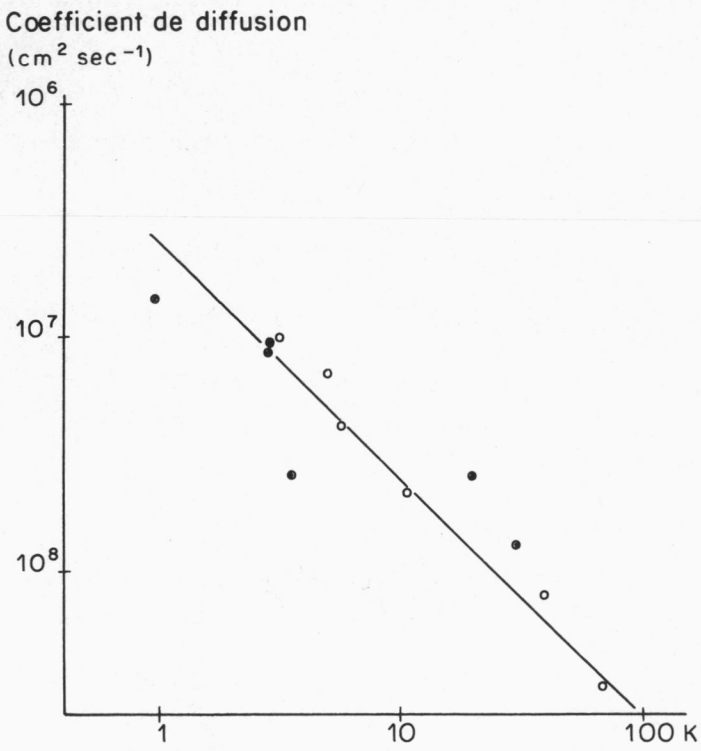


FIG. 7. — *Relation entre le coefficient de diffusion moléculaire de la propazine et le coefficient d'adsorption* (Walker, Crawford, 1970).

Relation between the molecular diffusion coefficient of propazine and the adsorption coefficient.

La figure 8 illustre l'effet de l'adsorption quand le transport a lieu par convection. Elle représente les courbes d'élution correspondant à une injection impulsionnelle de

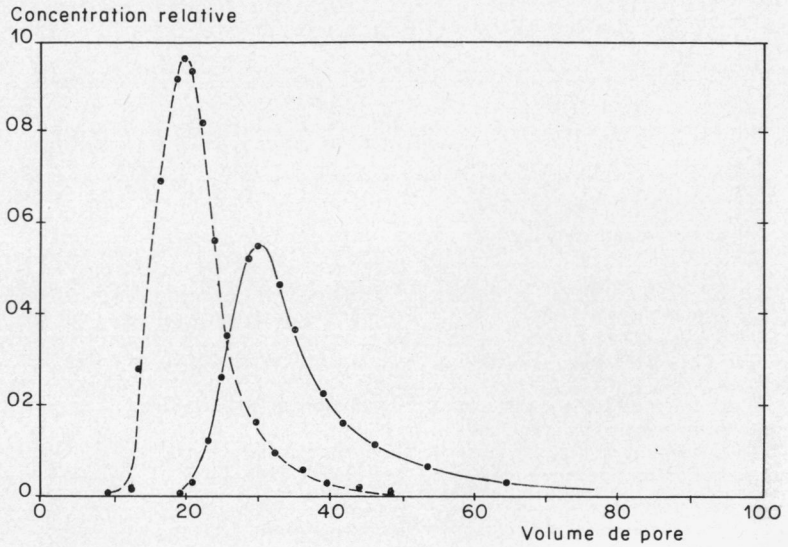


FIG. 8. — *Effet de l'adsorption sur le transport par convection* : 0,01 *N* $CaCl_2$ + *prométryne* (—●—) ; 0,01 *N* $CaCl_2$ + *fluométuron* (- -●- -) (Abernathy, Davidson, 1971).
Adsorption effect on the transport by convection.

fluométron et de prométryne. Cette dernière molécule, plus adsorbée, est éluée plus tardivement. Cet effet dépend de la valeur de la constante d'adsorption K_f. Il est parfois exprimé par un facteur dit facteur de retard dont l'expression est :

$$1 + \frac{\rho K_f}{\theta}$$

valable uniquement dans le cas d'une isotherme linéaire et d'équilibres d'adsorption et de désorption instantanés. Pour éviter toute hypothèse restrictive, il est possible de comparer le volume nécessaire à l'élution du pesticide au volume nécessaire à l'élution d'un soluté non adsorbé (Snelling *et al.*, 1969 ; Wierenga *et al.*, 1975).

Comme le montre le tableau 6, beaucoup de descriptions considèrent que l'équilibre d'adsorption est instantané. Si ce n'est pas le cas, cependant, d'importantes erreurs peuvent être faites comme le montrent les calculs de Lindstrom *et al.*, (1971) et ceux de Leistra et Dekker (1976). La figure 9 donne un exemple de courbes d'élution où l'effet d'un équilibre non instantané apparaît nettement. Ces erreurs peuvent devenir particulièrement importantes dans le cas des pesticides gazeux dont les déplacements se font essentiellement par diffusion moléculaire en phase gazeuse mais qui se trouvent en majeure partie dans le sol distribués dans les phases liquide et solide. C'est le cas par exemple du 1,3 dichloropropène (Leistra, 1970) et du méthylisothiocynate (Smelt et Leistra, 1974).

Enfin, il faut souligner qu'il est également important de tenir compte de l'hystérésis (Hornsby *et al.*, 1973 ; Van Genuchten *et al.*, 1974 ; Wierenga *et al.*, 1975). Outre les

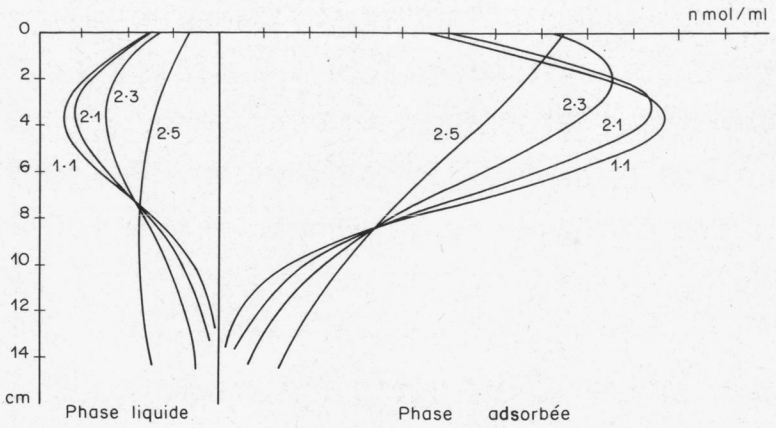


FIG. 9. — *Effet d'un équilibre non instantané sur le transport d'un soluté dans un milieu poreux* (Leistra et Dekker, 1976).
Les courbes représentent la distribution du soluté dans le milieu poreux :
1-1 : équilibre d'adsorption instantané.
2-1 ; 2-3 ; 2-5 : équilibres d'adsorption et de désorption non instantanés.
Les vitesses d'adsorption et de désorption décroissent dans l'ordre : 2-1 > 2-3 > 2-5.

Effect of a non instantaneous equilibrium on solute transport in a porous medium.
Curves represent the solute distribution in the porous medium :
1-1 : instantaneous adsorption equilibrium.
2-1 ; 2-3 ; 2-5 : non instantaneous adsorption and desorption equilibria.
Adsorption and desorption rates decrease in the order : 2-1 > 2-3 > 2-5.

difficultés liées à la résolution numérique de l'équation de transport, le principal obstacle est dû à l'absence fréquente d'informations suffisamment précises sur le phénomène de désorption.

TABLEAU 7

Relation entre le lessivage et le coefficient de distribution K_d (Riley et Morrod 1976)
Relation between the leaching and the distribution coefficient K_d

K_d	Distance de lessivage d'un pesticide appliqué sur la surface d'un sol si la pluie est supérieure de 25 cm à l'évapotranspiration. Pas de dégradation	Exemple
0,1		
1,0	Une grande partie du pesticide est lessivée au-delà des vingt premiers centimètres	Piclorame 2,4-D Atrazine
10	Une partie est lessivée mais le maximum de concentration est dans les vingt premiers centimètres	Diuron Ethirimol Lindane
10^2	Une très faible partie est lessivée et le maximum de concentration est dans les cinq premiers centimètres	Parathion
10^3		
10^4	Pas de lessivage visible	DDT paraquat

b) *Aptitude des pesticides à être transportés.*

Dans un but pratique, plusieurs auteurs ont essayé de classer les pesticides suivant leur aptitude à être transportés. De tels classements ont notamment été obtenus en utilisant la chromatographie sur couches minces de sol (Helling, 1971).

Le tableau 7 permet de situer les différents pesticides les uns par rapport aux autres.

Il apparaît ainsi que le transport est très limité dès que l'adsorption est un peu élevée ($K_d > 10$).

Une remarque s'impose à propos de ces comparaisons. Le déplacement d'un soluté est le résultat de l'action simultanée de plusieurs phénomènes étroitement dépendants non seulement des propriétés physico-chimiques des sols (adsorption...) mais aussi de la structure des sols (dispersion hydrodynamique, échanges entre liquide mobile et immobile...). Dans ces conditions, étudiant le transport de plusieurs pesticides dans un seul sol toujours conditionné de la même façon, il est possible de classer les molécules en tenant compte de leur aptitude à être adsorbées. Par contre, quand l'étude porte sur plusieurs sols, ce classement peut ne pas être valable car l'adsorption n'est plus le seul facteur à prendre en compte puisque la structure du milieu peut également varier.

Il faut également noter que des pesticides peuvent être déplacés dans le sol par suite du transport de particules colloïdales sur lesquelles ils sont adsorbés. Ceci a par exemple été observé avec le DDT adsorbé sur des acides humiques (Ballard, 1971).

C. — *Activité biocide et adsorption*

L'absorption des molécules pesticides se fait soit à partir de la solution du sol et dépend alors directement de la valeur de la concentration de celle-ci, soit à partir de la phase gazeuse et dans ce cas, dépend de la pression partielle du composé organique. Dans ces deux situations, l'adsorption joue un rôle déterminant puisqu'elle fixe aussi bien la concentration que la pression partielle. Il n'est pas possible d'exclure l'existence d'une absorption directe à partir de la phase adsorbée mais nous n'avons pas d'informations sur ce point.

Nous exposerons tout d'abord les différents aspect de la variation de l'activité biocide qui peut être attribuée aux phénomènes d'adsorption. Nous poursuivrons avec des études systématiques de l'influence de plusieurs adsorbants minéraux et organiques. Enfin nous nous interrogerons sur la possibilité de prévoir l'activité biocide à partir des propriétés du sol.

1. *Quelques aspects de la variation de l'activité biocide.*

Il est un fait bien connu des praticiens qu'un effet herbicide convenable dans un sol riche en matière organique ou en argile ne peut s'obtenir qu'en augmentant la dose appliquée. Par ailleurs, des apports importants de matière organique diminuent également l'effet herbicide. C'est le cas de la tourbe avec le benzthiazuron, le cycloate, l'alachlore et la pyrazone (Horowitz et Blumenfel, 1973), du fumier avec le nitrofen et l'oxyfluorfen (Fadayomi et Warren, 1977). Ces diminutions de l'effet herbicide peuvent être attribuées à l'adsorption, mais avec ce genre de résultats, il ne peut

s'agir que d'une hypothèse car une augmentation de la dégradation pourrait expliquer les mêmes variations.

D'autres observations vont également dans le même sens. Elles concernent les effets de différents additifs sur la population d'un sol en mauvaises herbes (tabl. 8).

TABLEAU 8

Effet de l'adsorption sur l'activité herbicide (Weber *et al.*, 1974)

Effect of adsorption on herbicide activity

Herbicide	Dose	Nombre de mauvaises herbes en plantes/m²									
		Graminées					Dicotylédones				
		Sol	Sol + argile	Sol + argile	Sol + matière organique		Sol	Sol + argile		Sol + matière organique	
			(ft)	(FT)	(ft)	(FT)		(ft)	(FT)	(ft)	(FT)
Non traité		37	48	39	37	46	140	102	114	175	114
Fluométron	faible	10	17	12	28	40	0	0	0	23	24
	élevée	1	5	6	19	39	0	0	0	0	24
Prométryne	faible	35	34	33	26	40	42	11	0	23	91
	élevée	28	38	30	31	38	11	22	0	21	67
Trifluraline	faible	2	2	4	4	7	77	131	110	124	151
	élevée	1	1	1	2	3	42	23	42	67	71
ppds (0,05)		16					50				

ft = faible teneur ; FT = forte teneur.

Il apparaît ainsi une moins bonne destruction des mauvaises herbes en présence de quantités élevées de matière organique (Weber *et al.*, 1974).

2. *Influence de différents adsorbants sur l'activité biocide.*

Un certain nombre d'auteurs ont étudié les effets de doses croissantes de différents adsorbants sur l'activité biologique de plusieurs herbicides. Il a été ainsi observé que la quantité résiduelle de simazine non phytotoxique dans un sol est d'autant plus

TABLEAU 9

Relation entre la teneur en matière organique et la quantité de simazine ne présentant pas d'effet phytotoxique (Williams, 1975)

Relation between the organic matter content and the non phytotoxic residual quantity of simazine

Teneur en matière organique p. 100	1,5	1,5-2,5	2,6-3,0	3,1-5,0	5
Teneur en simazine (ppm de sol séché à l'air)	0,05	0,10	0,15	0,2	0,25

grande que la teneur en matière organique est plus élevée (tabl. 9). Ce type d'observations est corroboré par l'existence d'une relation linéaire entre la quantité d'herbicide nécessaire pour réduire la croissance des tiges de 50 p. 100 et la teneur en matière organique des sols (Rahman, 1975).

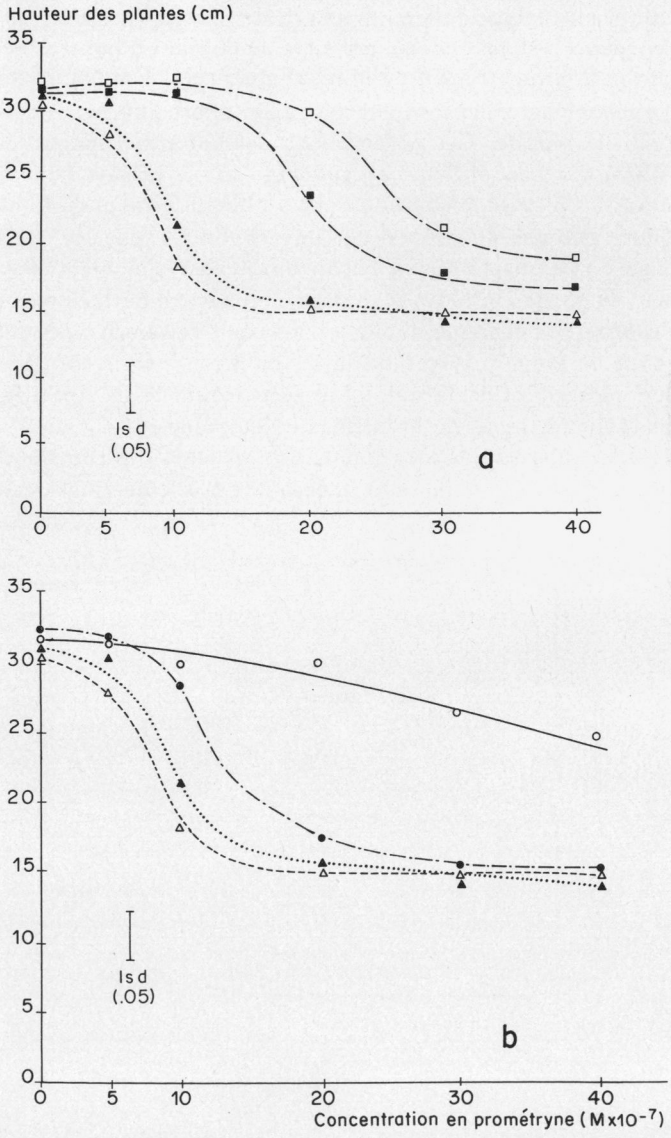


FIG. 10. — *Influence de la matière organique* (a) *et de la montmorillonite* (b) *sur l'activité herbicide de la prométryne* (Weber *et al.*, 1968).

Influence of organic matter (a) *and montmorillonite* (b) *on herbicide activity of prometryn.*
Sol témoin (Reference soil) : △ : pH = 4,3 ; ▲ : pH = 6,4.
Sol + matière organique (Soil + organic matter) : □ : pH = 4,1 ; ■ : pH = 6,4.
Sol + argile (Soil + clay) : ○ : pH = 4,3 ; ● : pH = 6,8.

L'effet de l'adsorption peut encore être plus justement invoqué pour interpréter des résultats tels que ceux de Weber *et al.* (1968). La figure 10 montre la variation de la hauteur de plantes de blé en fonction de la quantité de prométryne apportée à un sol artificiel ayant reçu différents traitements.

L'addition d'argile ou de matière organique diminue la phytotoxicité, cette diminution étant plus importante en milieu acide. Ceci s'interprète en considérant le rôle de l'adsorption : elle augmente par suite de l'apport d'adsorbant et quand le pH diminue puisque la prométryne est une base faible ($pK_a \simeq 4{,}05$). Cette augmentation entraîne un abaissement de la concentration de la phase liquide, ce qui a pour effet de diminuer l'activité biocide. Ces observations doivent être rapprochées de celles de Best *et al.* (1975) concernant l'effet du chaulage sur le prélèvement d'atrazine et de prométryne par les plantes. Il se traduit par un accroissement de la phytotoxicité qui peut s'expliquer par une diminution de l'adsorption.

L'influence de l'adsorption sur l'activité biocide est également bien illustrée par le comportement du paraquat. Nous savons en effet que cet herbicide cationique est très fortement adsorbé par échange d'ions sur les colloïdes électro-négatifs. Il en résulte une perte totale de toute activité biocide lorsqu'il est dans le sol (Riley *et al.*, 1976). Ceci explique que cet herbicide soit utilisé pour traiter le sol après les récoltes sans inconvénients pour les semis de fin d'été ou d'automne.

Des exemples intéressants sont donnés par les effets des charbons qu'il nous faut citer en raison de leur utilisation dans le domaine horticole notamment. La figure 11

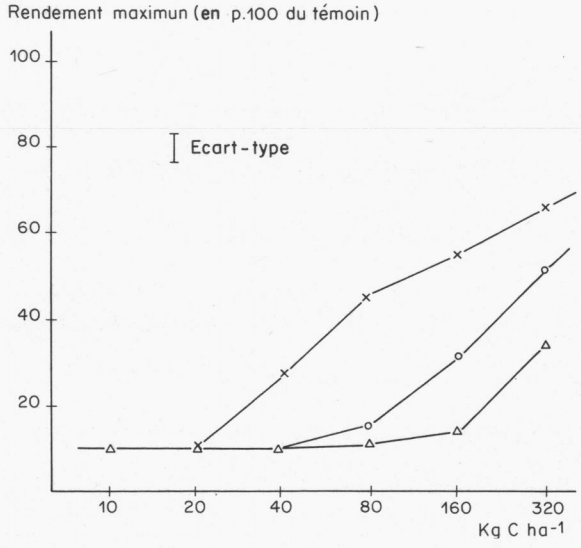


FIG. 11. — *Influence du charbon sur l'activité herbicide du diuron* (Toth, Milham, 1975) *pour des doses de* 8 *kg/ha* (×), 16 *kg/ha* (○) *et* 32 *kg/ha* (△).

Influence of charcoal on herbicide activity of diuron for application rates of 8 *kg/ha* (×), 16 *kg/ha* (○) *and* 32 *kh/ha* (△).

montre les variations de la production de feuilles de plants d'orge en fonction de la quantité de charbon ajoutée pour trois doses très élevées de diuron. Le rôle détoxifiant

du charbon peut être apprécié en notant qu'en son absence tout développement végétal de l'orge est supprimé à une dose de 2 kg/ha de produit herbicide.

De même, l'activité systémique de certains fongicides ou insecticides est diminuée dans les sols à forte capacité d'adsorption. Ainsi Fuchs *et al.* (1970), Schreiber *et al.*, (1971) et Leroux et Gredt (1974) rapportent que l'absorption du benomyl par les plantes est limitée dans les sols riches en argile, en matière organique ou de capacité d'échange élevée.

En ce qui concerne les pesticides gazeux, les phénomènes de dissolution ou d'adsorption peuvent entraîner une dilution dans le profil du sol, telle que le traitement de certains sols riches en matières organiques soit difficile à réaliser (Leistra, 1974).

3. *Prévision de la phytotoxicité en fonction de l'adsorption.*

Les résultats précédemment exposés montrent que l'activité biocide dépend de l'adsorption. Il est donc intéressant de savoir si cette dépendance peut être quantifiée. Une étude de la phytotoxicité de la simazine, du C.I.P.C. et du diuron sur une série de sols a conduit Harris et Sheet (1964) aux observations suivantes. La quantité d'herbicide nécessaire pour réduire la production de matière végétale fraîche de 50 p. 100 (Q 50) est correlée à l'adsorption pour la simazine et le diuron mais ne l'est pas pour le C.I.P.C... La figure 12 donne les résultats obtenus pour le diuron, les quantités

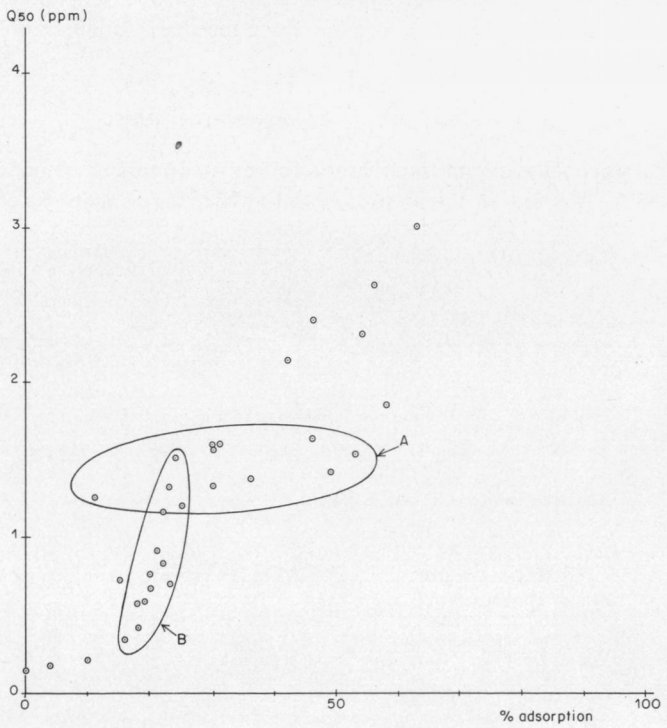


FIG. 12. — *Relation entre la quantité adsorbée et la quantité de diuron nécessaire pour réduire la production de matière végétale fraîche de 50 p. 100 (Harris et Sheet, 1964).*

Relation between the adsorbed quantity and the quantity of diuron able to reduce the plant production to 50 p. 100.

étant exprimée en pourcentage de la quantité totale présente dans le sol. Ce genre de représentation appelle plusieurs commentaires :

- les auteurs font justement remarquer que la représentation de l'adsorption n'est pas nécessairement bonne, dans la mesure où les isothermes ne sont pas linéaires ;
- il existe plusieurs sols pour lesquels l'activité biologique est constante alors que l'adsorption varie de 1 à 5 (zone A) ;
- il existe une autre série de sols pour lesquels l'adsorption est la même mais où l'activité biologique varie de 1 à 5 environ (zone B).

Outre la première remarque qui vient d'être faite, il est possible de penser que d'autres facteurs doivent être pris en considération : soit d'autres phénomènes (transport notamment), soit d'autres caractéristiques de l'adsorption. Ceci nous permet de souligner deux points :

- l'un se rapporte à l'intérêt limité de la corrélation ;
- l'autre concerne le besoin de connaître plus précisément la relation entre l'activité biologique et les phénomènes d'adsorption et de désorption.

La prévision de l'activité biocide d'un pesticide est en fait un problème très complexe. A côté de la dynamique des produits dans le milieu naturel, il faut aussi envisager tous les aspects relatifs à la physiologie des organismes vivants, notamment les effets possibles des facteurs climatiques. Ces derniers peuvent avoir un rôle prépondérant dans certaines situations comme l'ont montré Hance *et al.* (1968) pour plusieurs herbicides.

II. — Conséquences agronomiques

Une notion particulièrement importante doit être rappelée : la notion de persistance. La figure 13 représente schématiquement la courbe de disparition d'un herbi-

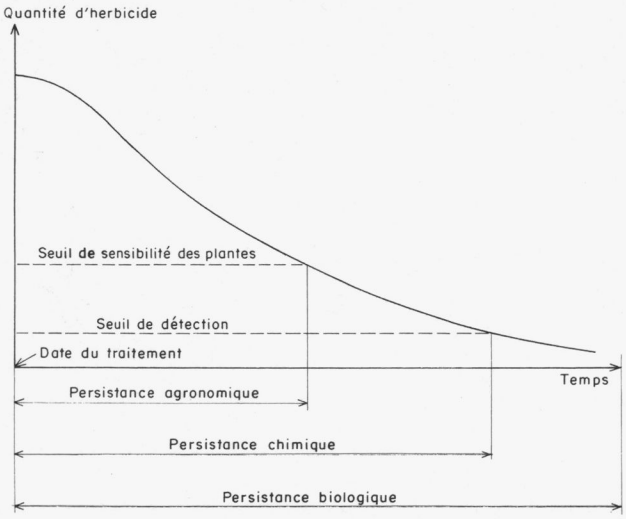


FIG. 13. — *Allure générale de la courbe de disparition d'un herbicide dans le sol.*
General shape of the disappearance curve of an herbicide in the soil.

cide. Trois types de persistance peuvent être définis selon la méthode d'observation utilisée (tabl. 10).

TABLEAU 10

Définitions de la persistance d'un herbicide
Definitions of herbicide persistance

Méthode	Définition	Nom
Observation d'un effet phytotoxique sur des plantes	Temps pendant lequel un effet phytotoxique est observable	Persistance agronomique
Analyses spécifiques, chimiques ou biologiques	Temps pendant lequel il existe des molécules non dégradées et détectables	Persistance chimique
Tout effet sur les êtres vivants	Temps pendant lequel un effet sur les êtres vivants peut être observé, effet dû soit à la molécule mère, soit à ses métabolites	Persistance biologique

Ne parlant pas des problèmes liés à l'environnement, seule la persistance biologique ne sera pas discutée ici. Il faut noter :

- que la persistance agronomique est appréciée par l'intermédiaire d'un effet phytotoxique et par conséquent, dépend directement de l'activité biocide de l'herbicide. Elle se trouve donc également dépendante de la concentration de la solution du sol et par là est influencée par les phénomènes d'adsorption. Ceux-ci ont donc deux conséquences : l'une sur les quantités d'herbicides à utiliser pour avoir une efficacité convenable, l'autre sur la persistance agronomique;
- que la persistance chimique se rapporte à la quantité totale de pesticide non dégradé présente dans le sol. Elle est déterminée par un dosage chimique précédé d'une extraction ou par un dosage biologique. Les résultats de ces deux dosages peuvent être modifiés par des phénomènes d'adsorption et il s'agit là d'une troisième conséquence.

Nous avons vu que l'activité biocide d'un herbicide pouvait être réduite par l'adsorption. Dans ces conditions, il est nécessaire d'augmenter les doses d'emploi, parfois dans des proportions non négligeables. C'est ainsi, par exemple, que dans les sols riches en argile et en matière organique, l'agriculteur peut être amené à doubler la dose normale. Il est malheureusement difficile de donner des chiffres précis car aucune expérimentation complète n'a été faite. A ceci vient s'ajouter le fait que le comportement d'un herbicide met en jeu, du point de vue agronomique, un très grand nombre de facteurs (phénomènes de dégradation, techniques de travail du sol, rotation, climat...), de telle sorte qu'il est toujours difficile de dégager l'influence propre de l'adsorption. Ce phénomène ne peut pas non plus être aisément relié à la persistance. Cette relation n'est pas quantifiable, mais un certain nombre d'observations la mettent très nettement en évidence.

Il faut tout d'abord rappeler le cas du diquat et du paraquat qui sont des herbicides fortement adsorbés. Leur persistance agronomique est très courte puisque leur activité biocide disparaît très rapidement. Leur persistance chimique est par contre beaucoup plus longue. Les observations de Holly et Roberts (1963) permettent également d'illustrer un effet possible de l'adsorption sur la persistance agronomique. Elles concernent la comparaison des comportements de plusieurs herbicides dans deux sols. Elles montrent que le temps nécessaire à la disparition de 50 p. 100 de l'herbicide et le temps pendant lequel un effet phytotoxique est détectable sont plus grands pour le sol possédant la capacité d'adsorption la plus élevée.

Il faut souligner une importante différence entre les autres herbicides et les cations bipirydillium due au fait qu'ils peuvent être désorbés. Dans ces conditions, l'adsorption ne supprime pas complètement l'acitvité biocide comme avec le diquat et le paraquat mais peut au contraire la maintenir pendant un certain temps, en limitant la dégradation.

L'estimation de la persistance chimique dépend d'une opération d'extraction, soit par un solvant, soit par un agent biologique. Dans les deux cas une mesure exacte implique une désorption complète. Celle-ci n'est cependant pas toujours réalisée. Rappelons tout d'abord les expériences de Khan (1973) qui montrent la possibilité d'une fixation irréversible par les acides humiques. Nous avons eu également l'occasion d'observer que l'extraction à reflux au méthanol de l'atrazine adsorbée sur une argile saturée par l'aluminium n'était pas complète (Tercé *et al.*, 1977). Par ailleurs, des études récentes effectuées sur un sol riche en argile (50,8 p. 100) et en matière organique (4,8 p. 100) constituent un bon exemple de ce problème. Le tableau 11 donne les quantités d'atrazine trouvées par analyse chimique faite à différents

TABLEAU 11

Quantités d'atrazine trouvées dans le sol à différentes dates. Il s'agit de parcelles portant une culture de blé qui succède à une culture de maïs ayant été traitée par de l'atrazine au semis ou un mois avant le semis (Jan *et al.*, 1977)

Quantities of atrazine found in the soil at several times. The results refer to experimental fields under wheat which have been sown after having previously been under maize. The land was treated with atrazine either a month before or at the same time as the sowing of the maize seeds

Dose atrazine g m. a./ha	Epoque de traitement	Travail du sol	Reliquats atrazine g m. a./ha				
			1975-76			1976-77	
			Janv.	Fév.	Mars	Déc.	Fév.
1 500	1 mois avant semis	Labour	297	356	121	81	—
		Travail superficiel	208	494	327	197	43
	au semis	Labour	286	508	184	286	—
		Travail superficiel	256	405	413	62	157
3 000	1 mois avant semis	Labour	340	675	297	300	259
		Travail superficiel	389	437	583	427	335
	au semis	Labour	435	621	359	221	—
		Travail superficiel	167	529	486	240	389

Le trait indique une quantité d'atrazine négligeable.

moments après le traitement d'un sol. Il apparaît qu'elles ne diminuent pas toujours en fonction du temps comme on pourrait s'y attendre si les seuls phénomènes de dégradation étaient concernés. L'explication la plus probable est que l'herbicide doit se trouver sous une forme adsorbée, difficilement désorbable mais qui doit évoluer vers une forme moins fortement retenue. Cette évolution pourrait être due aux modifications des matières organiques et des associations organo-minérales du fait de l'activité des microorganismes du sol.

Reçu pour publication en juillet 1980.

Remerciements

Nous remercions MM. R. Hance (Weed Research Organization, Oxford, England et J. Lhoste (Roussel-Uclaf, Paris) pour l'aide qu'il nous ont apportée dans la rédaction de ce mémoire.

Summary

Bibliographical review
Adsorption of pesticides by soils and their constituents
IV. — *Consequences of adsorption phenomena*

Degradation, transport and biocide activity of pesticides are greatly influenced by adsorption-desorption phenomena.

Observations relative to degradation processes seem often contradictory since the effects of adsorption may differ widely according to the abiotic or biologic nature of the transformations of pesticides. Adsorption generally increases abiotic degradation and decreases biologic degradation. Due to the surface acidity adsorbed molecules on clays may be degradated and this degradation depends on the type of clay, the nature of exchangeable cations and the water content. Degradation is frequently more important in dehydrated systems. Humic substances are also able to increase the abiotic degradation.

Soil solution concentration and partial pressure of pesticides depend on adsorption which in turn influences transport phenomena. Introduction of adsorption and desorption in equations of transport is generally difficult except with linear adsorption isotherms, instantaneous equilibrium and no hysteresis. The main point is that adsorption decreases the rate of transfer of pesticides in soils. However, there exist few detailed description of this effect because the small number of data on adsorption kinetics and hysteresis.

Several observations show the decrease of biocide activity of pesticide due to adsorption. This effect is only described qualitatively because there is no information permitting a quantitative description of biocide activity-adsorption relationship. Some consequences of adsorption are also described for application rates, persistance and extraction of residues from soils.

Zusammenfassung

Klarstellung der literaturangaben
Adsorption der pflanzenschutzmittel durch die boden und ihre bestandteile
IV. — *Folgen der adsorptionserscheinungen*

Die Adsorption-Desorptionerscheinungen haben einen wichtigen Einfluss auf den Abbau, den Transport und die biozide Tätigkeit der Pflanzenschutzmittel.

Die Beobachtungen bezüglich des Abbaus sind oft anscheinend gegensätzlich, denn die Adsorptionswirkungen können sehr veränderlich sein je nachdem es sich um abiotische oder biologische Umsetzungen handelt. Im ersten Fall erhöht allgemein die Adsorption den Abbau während sie dieselbe im zweiten Fall ermindert. Der Oberflächesaüregrad der Tonerden kann den Abbau der auf diese

Mineralien adsorbierten Molekülen erzeugen. Die Beschaffenheit der austauschbaren Kationen und der Wassergehalt sind wichtige Parameter und die Abbauvorgänge sind oft mehr ausgeprägt in Trockensystemen. Die Humuskolloiden sind auch fähig, den Abbau zu verstärken.

Indem die Adsorption den Pflanzenschutzmittelgehalt und- teildruck in Bodenlösung teilweise bestimmt, beeinflusst sie auch die Transporterscheinungen. Ihre Eintragung in den Formalismus der übertragungen ist nur einfach in den Sonderfällen dass die Adsorptions isotherme linear und das Adsorptionsgleichgewicht plötzlich sind und dass es keine Hysteresis gibt. Allgemeinerweise vermindert die Adsorption die Pflanzenschutzmittelverlagerungen. Es gibt dennoch wenige genau untersuchten Beschreibungen dieses Effekts, denn die Daten über die Adsorptionskinetik und Hysteresis sehr ungenügend sind.

Mehrere Beobachtungen zeigen dass die Adsorption die biozide Tätigkeit der Pflanzenschutzmittel vermindern kann. Dieser Effekt ist nur qualitativ beschrieben, denn es gibt keine Information, die es ermöglicht, eine quantitative Beschreibung der Beziehung zwischen der bioziden Tätigkeit und der Adsorption zu machen. Diese Erscheinung hat auch praktische Folgen auf die Gebrauchsdosen, die Wirkungsbeständigkeit und die mögliche Extraktion der in Böden verlagerten Rückständen.

РЕЗЮМЕ

Адсорбция пестицидов в почвах и в составных частях почв.
Библиографическое обозрение.

IV. Следствия явлений адсорбции.

КАЛЬВЕ Р., ТЕРСЕ М., АРВЬЁ Ж. С.

Явления адсорбции и десорбции оказывают большое влияние на деградацию, движения и биоцидную активность пестицидов.

Результаты наблюдений за деградацией часто противоречивы, потому что следствия адсорбции могут быть очень разными /абиотичные превращения или биологические превращения/. В первом случае адсорбция увеличивает деградацию, но во втором случае она её уменьшает. Поверхностная кислотность глины может лежать в основе деградации молекул, адсорбированных на этом минерале. Сущность обменных катионов и содержание воды-важные параметры и реакции деградации ярче выражены в дегидратированных системах. Гумусные коллоиды тоже способны увеличить деградацию.

Адсорбция тоже оказывает влияние на движения пестицидов, частично обуславливая содержание почвенного раствора или давление пестицида. Легко включить адсорбцию в числовую формулировку переносов лишь в случае, если изотермы адсорбции линейные, равновесие адсорбции мгновенно и если гистерезиса нет.

Вообще, адсорбция уменьшает движения пестицидов. Однако, мало точных описаний этого действия из-за недостака данных о кинетике адсорбции и гистерезисе.

Несколько наблюдений показывают, что адсорбция может уменьшить биоцидную активность пестицидов. Это действие описано качественно из-за недостака данных, позволяющих количественное описание зависимости биоцидной активности от адсорбции. Это явление тоже оказывает влияние на дозы применения, на стойкость и на возможности извлечения остатков из почв.

Références bibliographiques

ABERNATHY J., DAVIDSON J. M., 1971. Effect of calcium chloride on prometryne and fluometuron adsorption in soil. *Weed Sci.* **19** (5), 517-521.

ARMSTRONG D. E., CHESTERS G., 1968. Adsorption catalysed chemical hydrolysis of atrazine. *Environ. Sci. Tech.* **2** (9), 683-689.

ARMSTRONG D. E., CHESTERS G., HARRIS R. F., 1967. Atrazine hydrolysis in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **31**, 61-66.

BABIKER A. G. T., DUNCAN H. J., 1977. Influence of soil depth on asulam adsorption and degradation. *Soil Biol. Biochem.* **9** (3), 197-201.

BALLARD T. M., 1971. Role of humic carrier substances in D.D.T. movements through forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35**, 145-147.

BEST J. A., WEBER J. B., MONACO J. J., 1975. Influence of soil pH on s-triazine availability to plants. *Weed Sci.* **23** (5), 378-384.

BROWN C. B., WHITE J. L., 1969. Reactions of 12 s-triazines with soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **33** (6), 863-867.

CALL F., 1957. The diffusion of ethylene dibromide vapor in air. *J. Sci. Food Agric.* **8,** 86-89.

CALVET R., GRAFFIN P., 1974. Description mathématique des phénomènes de transport des solutions aqueuses dans les milieux poreux. *Ann. agron.* **25** (2-3), 123-155.

CHAUSSIDON J., CALVET R., 1975. *Catalytic reactions on clays surfaces. Environmental quality and safety.* Supplément Vol III. 230-236. Georg. Thieme Publishers Stuttgart.

CRANK J., 1975. *The mathematics of diffusion.* Oxford at the Clarendon Press. 5th. Edition, 347 p.

CRUZ M., WHITE J. L., RUSSEL J. D., 1968. Montmorillonite s-triazine interaction. *Isr. J. chem.* **6,** 315-323.

DAVIDSON J. M., BAKER D. R., BRUSEWITZ G. H., 1975. Simultaneous transport of water and adsorbed solutes through soil under transient flow conditions. *Trans. ASAE,* 16-3.

DAVIDSON J. M., CHANG R. K., 1972. Transport of picloram in relation to soil physical conditions and pore water velocity. *J. Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **113** (3), 257-261.

DAVIDSON J. M., MAC DOUGAS J. R., 1973. Experimental and predicted movement of three herbicides in a water saturated soil. *J. Env. Qual.* **2,** 428-433.

DE WIEST J. M., 1969. *Flow through porous media.* Academic Press New York and London. 529 p.

FADAYOMI O., WARREN G. F., 1977. Adsorption desorption and leaching of nitrofen and oxyfluorfen. *Weed Sci.* **25** (2), 97-100.

FOWKES F. M., BENESI H. A., RYLAND L. B., SAWYER W. M., DETLING K. D., LOEFFLER E. S., FOLCKEMER F. B., JOHNSON M. R., SUN Y. P., 1960. Clay catalysed decomposition of insecticides, *J. Agr. Food Chem.* **8** (3), 203-210.

FRIED J. J., CAMBARNOUS M. A., 1971. Dispersion in porous media. *Adv. Hydrosciences* **7,** 169-282.

FUCHS A., HOMANS A. L., DEVRIES F. W., 1970. Systemic activity of benomyl against fusarium wilt of pea and tomato plants. *Phytopathol. Z.* **69,** 330-343.

GORING C. A. I., CLEVE A. T., HAMAKER J. W., YOUNGSON Ch. R., 1966. Sorption and leaching of 4-amino 3, 5, 6-trichloropicolinic acid in soils. *Adv. Chem. Sci.* **60,** 23-37.

GROVER R., 1977. Mobility of dicamba. Picloram and 2,4-D in soil columns. *Weed Sci.* **25** (2), 159-162.

HANCE R. J., 1969. Further observations of the decomposition of herbicides in soils. *J. Agr. Food Agric.* **21,** 144-195.

HANCE R. J., 1970. Influence of sorption on the decomposition of pesticides. « Sorption and transport process in soils ». *Soc. Chem. Industry Monograph* **37,** 92-104.

HANCE R. J., HOCOMBE S. D., HOLROYD J., 1968. The phytotoxicity of some herbicide in field and pot experiments in relation to soil properties. *Weed Res.* **8,** 136-144.

HARRIS C. C., 1966. Adsorption, movement and phytotoxicity of monuron and s-triazine herbicides in soil. *Weeds* **14** (1), 6-10.

HARRIS C. C., SHEETS J. J., 1964. Influence of soil properties on adsorption and phytotoxicity of CIPC, Diuron and Simazine. *Weeds,* 215-219.

HELLING Ch. S., 1971. Pesticide mobility in soils : I. — Parameter of thin layer chromatography. II. — Application of soil thin layer chromatography. III. — Influence of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35** (5), 732-748.

HELLING Ch. S., KEARNEY P. C., ALEXANDE M., 1971. Behavior of pesticides in soils. *Adv. Agron.* **23,** 147-229.

HOLLY R., ROBERTS H. A., 1963. Persistance of phytotoxic residues of triazine herbicides in soils. *Weed Res.* **3,** 1-10.

HORNSBY A. G., DAVIDSON J. M., 1973. Solution and adsorbed fluometuron concentration distribution in a water saturated soil. Experimental and predicted evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **37** (6), 823-828.

HOROWITZ M., BLUMENFEL D., 1973. Phytotoxicity of four herbicides in different synthetic soils. *Phytoparasitica* **1** (2), 101-110.

JAN P., HAUCOURT A., RUIZ J., 1977. Persistance d'action de l'atrazine. *C. R.* 9e *Conférence du* COLUMA, *Tome* 1, 41-48.

JOST W., 1960. *Diffusion in solids, liquids and gases.* Academic Press Inc Publishers. New York, 652 p.

KAY B. D., ELRICK D. E., 1967. Adsorption and movement of lindane in soils. *Soil Sci.* **104** (5), 314-322.

KHAN S. U., 1973. Interaction of humic acid with chlorinated phenoxyacetic and benzoic acids. *Environmental letters* **4** (2), 141-148.

KONRAD J. G., ARMSTRONG D. E., CHESTERS G., 1967. Soil degradation of diazinon, a phosphorothioate insecticide. *Agron. J.* **59,** 591-4.

KONRAD J. G., CHESTERS G., ARMSTRONG D. E., 1969. Soil degradation of malathion, a phosphorothionate insecticide. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **33,** 259-262.

LAMBERT J. M., PORTER P. E., SCHIEFERSTEIN R. H., 1965. Movement and sorption of chemicals applied to the soil. *Weeds* **13,** 185-190.

LEISTRA M., 1970. Distribution of 1-3 dichloropropene over the phases in soil. *J. Agric. Food Chem.* **18,** 1124-1126.

LEISTRA M., 1971. Diffusion of 1-3 dichloropropene from a plane source in soil. *Pestic. Sci.* **2,** 75-79.

LEISTRA M., 1974. Predictions of effectivity and after effects of metamsodium by simulating soil fumigations. *Neth. J. pl. Path.* **80,** 61-71.

LEISTRA M., DEKKERS W. A., 1976. Computed effects of adsorption kinetics on pesticides movement in soils. *J. Soil Sci.* **28,** 340-350.

LEROUX P., GREDT M., 1974. Etude de l'activité systémique du benomyl, du carbendazime, du methylthiophanate et de la tiophamine utilisés en enrobage des semences. *Phytiatrie Phytopharm.* **23,** 51-68.

LI G. C., FELBECK G. T., 1972. A study of the mechanism of atrazine adsorption by humic acid from much soils. *Soil Sci.* **113** (2), 140-148.

LINDSTROM F. T., BOERSMA L., STOCKARD D., 1971. A theory on the mass transport of previously distributed chemicals in a water saturated sorbing porous mesium : isothermal cases. *Soil Sci.* **112** (5), 291-300.

MAC HENRY M. V., THOMASON I. J., 1974. 1-3 dichloropropene and 1-2 dibromoethane compounds movements and fate as affected by various conditions in several soils. *Hilgardia* **42,** 393-421.

MINGELGRIN U., SALTZMAN S., YARON B., 1977. A possible model for the surface induced hydrolysis of organophosphorus pesticides on kaolinite clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **41,** 519-533.

MOYER J. R., HANCE R. S., Mc KONE C. E., 1972. The effect of adsorbents on the rate of degradation of herbicides incubated with soil. *Soil biol. biochem.* **4** (3), 307-311.

NEARPASS D. C., 1972. Hydrolyses of propazine by the surface acidity of organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **36** (4), 606-610.

RAHMAN A., 1975. Effect of soil organic matter on the phytotoxicity of soil applied herbicides glass house studies. *J. exper. agric.* **4,** 85-88.

RILEY D., MORROD R. S., 1976. Relative importance of factors influencing the activity of herbicides in soil. *Proc. Br. Weed Control, Conf.* **3** (13), 971-980.

RILEY D., WILKINSON W., TUCKER B. V., 1976. Biological unavailability of bound paraquat residues in soil. *ACS Symp.* Ser. 29, *Bound and conjugated prestic residues symp.*, 1975, 301-353.

ROSENFIELS C., VAN VALKENBURG W., 1965. Decomposition of (0,0 dimethyl 0.2.4.5. trichlorophenyl phosphorothionate (Ronnel) adsorbed on bentonite and other clays. *J. Agr. Food Chem.* **13** (1), 68-72.

RUSSEL J. D., CRUZ M. I., WHITE J. L., 1968*a*. The adsorption of 3 aminotriazole by montmorillonite. *J. Agr. Food Chem.* **16** (1), 21-24.

SALTZMAN S., MINGELGRIN U., YARON B., 1976. The role of water in the surface catalysed hydrolysis of phosphate esters on kaolinite. *J. Agric. Food Chem.* **24,** 739-742.

SALTZMAN S., YARON B., MINGELGRIN U., 1974. The surface catalysed hydrolysis of parathion on kaolinite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **38,** 231-234.

SCHREIBER L. R., HOCK W. K., ROBERTS B. R., 1971. Influence of planting media and soil on the uptake of benomyl by American Elm seedlings. *Phytopath.* **61,** 1512-1515.

SCOTT H. D., PHILIPPS R. E., PAETZOLD R. F., 1974. Diffusion of herbicide in the adsorbed phase. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **38** (4), 558-562.

SKIPPER H. D., VOLK V. V., MORTLAND M. M., RAMAN K. V., 1978. Hydrolysis of atrazine on soil colloids. *Weed Sci.* **26** (1), 46-51.

SMELT J. H., LEISTRA M., 1974. Conversion of metam sodium to methyl isothiocyanate and basic data on the behaviour of methyl isothiocyanate in soil. *Pestic. Sci.* **5,** 401-407.

SNELLING K. W., HOBBS J. A., POWERS W. L., 1969. Effects of surface aera exchange capacity and organic matter content on miscible displacement of atrazine in soils. *Agron. J.* **61,** 875-878.

SOULAS G., 1975. Influence du taux d'argile sur la persistance de l'atrazine dans le sol. 8e *Conférence du Columa*. Tome 1, 3-10.

SUNG-HO LAI, JURINAK J. J., 1972. The transport of cations in soil columns at different pore water velocity. *J. Sci. Soc. Am. Proc.* **36** (5), 730-734.

TERCE M., LEFEBVRE-DROUET E., CALVET R., 1977. Degradation of adsorbed atrazine on an aluminium montmorillonite. *Chemosphere* **11,** 753-758.

TOTH J., MILHAM P. J., 1975. Activated carbon and ash-carbon effects on the adsorption and phytotoxicity of diuron. *Weed Res.* **15** (3), 171-176.

VAN GENUCHTEN M. Th., DAVIDSON J. M., WIERENGA P. J., 1974. An evaluation of kinetic and equilibrium equations for the prediction of pesticide movement through porous media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **38,** 29-36.

VAN GENUCHTEN M. Th., WIERENGA P. J., 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media. I Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **40** (4), 473-480.

VILLERMAUX J., 1974. Deformation of chromatographic peaks under the influence of mass transfer phenomena. *J. chromato. Sci.* **12,** 822-831.

WALKER A., CRAWFORD D. C., 1970. Diffusion coefficients for two triazine herbicides in six soils. *Weed Res.* **10,** 126-132.

WEBER J. B., PERRY P. W., IBARAKI K., 1968. Effect of pH on the phytotoxicity of prometryne applied to synthetic soil media. *Weed Sci.* **16,** 134-136.

WEBER J. B., WEED S. B., WALDREP T. W., 1974. Effect of soil constituents on herbicide activity in modified soil field plots. *Weed Sci.* **22** (5).

WIERENGA P. J., 1977. Solute distribution profiles computed with steady-state and transient water movement models. *Soil Sci. Am. J.* **41,** 1050-1055.

WIERENGA P. J., SHAFFER M. J., GOMEZ S. P., O'CONNOR G. A., 1975. Predicting ionic distributions in large soils columns. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **39,** 1082-1084.

WILLIAMS J. H., 1975. The role of organic matter in pesticide behavior. *Welsh soils discuss groupe* **16,** 107-119.

WU C. H., BUEHRING N., DAVIDSON J. M., SANTELMANN P. W., 1975. Napropamide adsorption desorption and movement in soils. *Weed Sci.* **23** (6), 454-457 (M).

YARON B., 1975. Chemical conversion of parathion on soil surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **39,** 639-643.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 413-427.

Mise au point bibliographique
Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants
V. — Les méthodes d'étude de l'adsorption

R. CALVET *, Martine TERCÉ * et J. C. ARVIEU **

* *Station de Science du Sol*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

** *Station de Science du Sol*
Centre de Recherches d'Antibes, I.N.R.A.,
06602 *Antibes*

Résumé

Les traitements des matériaux adsorbants précédant les mesures peuvent avoir une influence notable sur les résultats obtenus. L'acidification et la déshydratation peuvent modifier considérablement les propriétés d'adsorption des colloïdes du sol.

Les méthodes de mesure de l'adsorption utilisent soit des mélanges d'adsorbant et de solution en proportions variables, soit des écoulements de solution dans des systèmes plus ou moins hydratés. Les mesures sur les suspensions sont nombreuses contrairement aux mesures faites dans des conditions voisines de celles des sols en place. Ceci est dû à une absence de méthodes appropriées et a pour conséquence une presque totale ignorance des modalités d'expression des phénomènes d'adsorption-désorption dans le milieu naturel.

L'analyse des caractéristiques des molécules adsorbées est essentiellement limitée aux systèmes adsorbant-pesticide susceptibles d'être étudiés par des méthodes spectroscopiques ou de diffraction des rayons X. Il en résulte que la plupart des informations obtenues concernent des produits adsorbés sur des smectites. Elles ont permis d'identifier certaines liaisons existant entre les molécules et la surface et de mettre en évidence des phénomènes de dégradation.

I. — Préparation des adsorbants

La préparation des matériaux adsorbants n'a pas encore reçu toute l'attention qu'elle mérite. Son importance peut cependant être très grande en raison des conséquences qu'elle peut avoir sur les propriétés des corps étudiés. Il faut en effet se rappeler que l'adsorption est un phénomène de surface et qu'il dépend :

— de l'aire de l'interface solide/phase gazeuse ou liquide,

— de l'accessibilité de cet interface,

— des propriétés physico-chimiques de la surface de l'adsorbant.

Toute opération qui a pour effet de modifier l'un ou l'ensemble de ces trois facteurs a une influence sur la mesure de l'adsorption qui la suit.

Bien qu'il existe peu d'études systématiques, il est tout de même possible d'examiner les éventuelles conséquences des traitements couramment utilisés.

A. — *Traitements des constituants du sol*

1. *Traitements de saturation ionique.*

Dans le but d'étudier des systèmes homoioniques des traitements de saturation ionique sont fréquemment effectués. Ils peuvent entraîner des modifications des propriétés des argiles :

— soit au cours d'un passage en milieu acide (souvent réalisé avec des résines échangeuses de cations),

— soit au cours d'opérations de lavage (par centrifugation ou dialyse), dans le but d'éliminer les excès de sels.

Les modifications correspondantes sont dues à l'hydrolyse des réseaux cristallins qui amène la libération d'ions Al^{3+} et la formation d'hydroxydes sur les surfaces, composés qui jouent un rôle très important comme nous l'avons vu dans la deuxième partie de cette mise au point bibliographique.

Pour les adsorbants organiques, les traitements de saturation ionique peuvent provoquer des modifications de configuration moléculaire dont les effets sur l'adsorption risquent de ne pas être négligeables.

Quand un adsorbant minéral ou organique est mis sous une forme ionique quelconque, il faut donc considérer que la nature des cations compensateurs n'est pas le seul facteur à avoir été modifié.

2. *Traitements de déshydratation.*

De tels traitements sont parfois utilisés pour obtenir une meilleure conservation des adsorbants. Ils ont cependant des effets qu'il est utile de connaître. Ils peuvent en effet être à l'origine d'une augmentation de la capacité d'adsorption comme l'a observé Bowman (1975) pour l'adsorption du fensulfothion sur des montmorillonites ayant subi divers traitements (fig. 1). A ce sujet, il faut rappeler que la congélation de suspensions d'argile a des effets analogues à la déshydratation (Anderson, 1966).

La déshydratation d'un adsorbant peut aussi entraîner une évolution plus ou moins réversible de sa structure :

— pour les argiles saturées par le calcium et l'aluminium notamment, elle entraîne une augmentation de la taille des agrégats (Gaillardon *et al.*, 1976),

— pour les matières organiques, elle provoque la création de nouvelles liaisons entre les chaînes carbonées entraînant une diminution des propriétés de gonflement (Van Dijk, 1971).

Ces dernières modifications peuvent concerner aussi bien la capacité d'adsorption que les caractéristiques des cinétiques d'adsorption et de désorption.

B. — *Traitements des sols*

Les considérations précédentes s'appliquent aussi aux sols. Les traitements de saturation ionique n'ont en fait aucun intérêt, mais par contre, ce n'est pas le cas de la

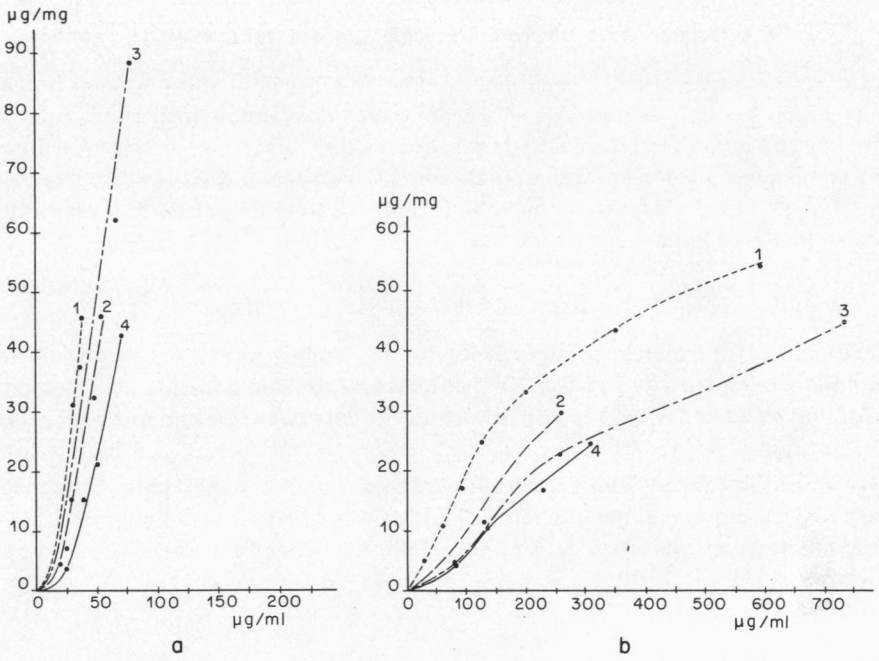


FIG. 1. — *Isothermes d'adsorption du fensulfothion sur la montmorillonite-Ca* (a) *et sur l'illite-Ca* (b).
1) Argile lyophyllisée ; 2) Argile lyophyllisée et remise en suspension ; 3) Argile lyophyllisée et hydratée dans l'air à une humidité relative de 100 p. 100 ; 4) Argile en suspension.

Adsorption isotherms of fensulfothion on calcium-montmorillonite (a) *and on calcium-illite* (b).
1) Lyophyllized clay ; 2) Lyophyllized clay resuspended in water ; 3) Lyophyllized clay hydrated in air with 100 p. 100 relative humidity ; 4) Clay in suspension.

déshydratation. De ce point de vue, il serait utile de comparer les propriétés de sols séchés à celles de sols conservés humides.

Une opération fréquente par ailleurs est le tamisage dont il est préférable de s'assurer des conséquences sur la capacité d'adsorption et sur les cinétiques. Enfin, il peut être utile de s'interroger sur les effets des traitements de stérilisation, notamment par autoclavage.

II. — Méthodes de mesure des quantités adsorbées

L'adsorption des pesticides gazeux ne fait pas appel à des méthodes particulières. Celles qui sont couramment utilisées relèvent des techniques classiques de l'adsorption des gaz telles qu'on peut les trouver décrites dans plusieurs ouvrages (Brunauer, 1945 ; Fripiat *et al.*, 1971). Dans ce cas, la principale difficulté consiste à distinguer correctement l'adsorption à l'interface gaz/solide de la dissolution du gaz dans l'eau du sol étudié, à moins que l'échantillon soit parfaitement déshydraté, ce qui représente un cas d'intérêt très limité.

Les mesures d'adsorption à l'interface liquide/solide feront par contre, l'objet d'une discussion plus détaillée car elles sont les plus fréquentes et souvent les moins bien définies. Ce paragraphe leur est donc entièrement consacré.

A. — *Adsorption mesurée avec des mélanges d'adsorbant et de solution*

Ces méthodes consistent à mettre en contact un adsorbant plus ou moins pulvérulent avec une solution de pesticide. Après un temps convenablement choisi pour que l'équilibre soit atteint, la phase liquide est séparée de l'adsorbant et analysée à l'aide d'une technique appropriée. Deux points sont intéressants à discuter : l'influence du rapport de la masse d'adsorbant au volume de solution et les procédés de séparation de la solution à l'équilibre.

1. *Influence du rapport R = masse d'adsorbant/volume de solution.*

L'examen des travaux publiés révèle que le rapport utilisé varie considérablement de l'un à l'autre : de 25 à $2{,}5.10^{-5}$, ce qui constitue une difficulté pour comparer les résultats et savoir à quel type d'adsorbant les attribuer. Ce rapport peut en effet être important :

— quand la concentration d'une suspension de sol diminue, la taille des agrégats décroît, entraînant une augmentation de l'adsorption attribuable à l'augmentation de l'aire de l'interface solide/liquide. La figure 2 illustre l'effet de la variation du rapport R (Grover et Hance, 1970) ;

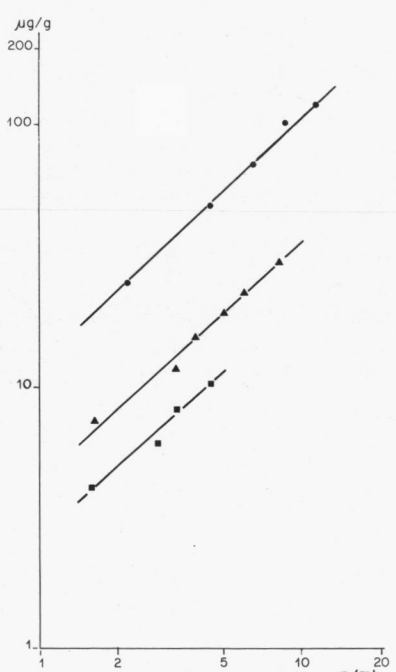


FIG. 2. — *Isothermes d'adsorption du linuron correspondant à trois rapports masse de sol/volume d'eau différents* : 1/10 (●), 1/1 (▲), 4/1 (■) (Grover, Hance, 1970).

Adsorption isotherms of linuron with three soil-water ratios : 1/10 (●), 1/1 (▲) and 4/1 (■).

— la dilution d'une suspension peut entraîner une modification des propriétés

de la surface. Ceci a notamment été observé en milieu acide pour l'adsorption de l'atrazine (Vallet *et al.*, 1973), et de la terbutryne par une montmorillonite (Calvet et Tercé, 1978). Ce comportement peut être dû à un accroissement de l'aluminisation de l'argile quand la concentration de la suspension diminue.

2. *Procédés de séparation de la phase liquide à l'équilibre.*

a) *Centrifugation.*

C'est le procédé le plus employé et le plus commode à beaucoup d'égards. Il présente cependant un certain nombre d'inconvénients :

— la température de centrifugation doit être la même que celle du système adsorbant-solution pendant le contact. Il faut donc disposer d'une centrifugeuse réfrigérée,

— quand les mesures sont réalisées avec des pâtes ou des échantillons de sol amenés à des teneurs en eau inférieures à leur capacité de rétention, la centrifugation peut ne pas être utilisable.

b) *Extraction sous pression.*

Le mélange adsorbant-solution est extrait sous pression dans un extracteur utilisé classiquement pour déterminer la courbe caractéristique d'hydratation des sols. La phase liquide peut ainsi être séparée aussi bien d'une pâte de sol que d'une suspension diluée (Burns *et al.*, 1973 ; Savage et Wauchope, 1974 ; Savage, 1976 ; Hance et Embling, 1979). Cette méthode permet également d'étudier les variations de l'équilibre d'adsorption en fonction de la teneur en eau.

c) *Filtration sur gel.*

Le mélange adsorbant-solution à l'équilibre est filtré sur un gel de séphadex. Cette méthode a été utilisée pour étudier l'adsorption du diquat et du paraquat sur des acides humiques (Khan, 1973*a* ; Burns *et al.*, 1973). Le principe est le suivant : les molécules de paraquat non adsorbées peuvent diffuser dans la microporosité du gel alors que les acides humiques ne le peuvent pas du fait de leur poids moléculaire plus important. Ils sont alors élués en premier et il est possible de connaître la quantité de cations organiques adsorbés. La réussite de cette méthode est soumise à plusieurs conditions :

— il ne faut pas que l'équilibre d'adsorption soit modifié par le passage dans le gel. Ceci n'est réalisé que si l'interaction adsorbant soluté est très forte comme c'est le cas dans l'exemple cité,

— l'adsorbant ne doit pas être retenu par le gel. Ceci est obtenu pour les acides humiques en utilisant des solutions de chlorure de sodium,

— l'adsorbant ne doit pas être floculé dans le gel,

— le gel doit posséder une porosité appropriée pour effectuer la séparation.

Toutes ces contraintes font que ce procédé est d'un intérêt très limité.

3. *Calcul de la quantité adsorbée.*

La quantité adsorbée Q_a est simplement calculée par la relation :

$$Q_a = \frac{Q_t - VC_e}{m}$$

où :

Q_t = quantité totale présente dans le système,
V = volume de solution à l'équilibre,
C_e = concentration de la solution à l'équilibre,
m = masse d'adsorbant,
Q_a = quantité adsorbée par gramme d'adsorbant.

Ce calcul n'est rigoureux que dans le cas des solutions diluées comme nous l'avons expliqué dans la première partie de cette mise au point. De plus, il ne peut être utilisé qu'en l'absence de phénomènes de cristallisation et de dégradation.

Green et Yamane (1970) ont présenté une discussion sur la précision de cette détermination essentiellement liée à la précision de la mesure de Ce.

B. — *Adsorption avec écoulement d'une solution*

1. *Mesure sur des colonnes d'adsorbant.*

a) *Mesure par extraction du produit adsorbé.*

Cette méthode utilisée par Green et Corey (1971) est particulièrement simple. Le sol (1 g) est mis dans un petit tube et on fait écouler à vitesse modérée (12 ml/h) 30 ml d'une solution de pesticide. Après le ressuyage de l'échantillon, l'extraction est effectuée en faisant circuler 50 ml d'un solvant organique approprié (ex. : méthanol pour l'atrazine, acétone pour le diuron). Celui-ci contient une quantité de produit (Q_{ext}) égale à la somme de la quantité adsorbée Q_a et de la quantité existant dans la solution restant dans les pores après le ressuyage

$$Q_a = Q_{ext} - V_p C_e$$

où V_p et C_e sont respectivement le volume de solution restant dans les pores et la concentration de cette solution.

Cette méthode peut également être utilisée pour étudier la désorption. Elle présente en outre, d'après les auteurs qui l'ont appliquée, les avantages d'être plus précise que la méthode précédente et de limiter la destruction des agrégats. La principale critique concerne l'extraction par un solvant organique. Nous avons vu en effet qu'une fraction de pesticide adsorbé pouvait ne pas être extraite sans procéder à une destruction partielle de l'adsorbant. Dans ces conditions, cette méthode risque de conduire à des résultats erronés.

b) *Mesure par élution.*

Soit une colonne d'un matériau adsorbant dont les pores sont remplis par de l'eau. Cette colonne est successivement soumise à une alimentation par un volume limité de solution de pesticide, puis à une alimentation continue par de l'eau (fig. 3). L'éluat est recueilli et analysé permettant ainsi d'obtenir un pic d'élution du pesticide. Il est possible d'effectuer un calcul numérique pour en déduire les caractéristiques de l'adsorption, mais il s'agit là d'une opération difficile à mener dans le cas général. Il est cependant possible d'avoir un traitement simplifié à condition d'accepter certaines approximations. C'est ainsi que Swoboda et Thomas (1968) proposent de calculer le coefficient de distribution K_d de la façon suivante :

$$K_d = \left(\frac{V_{1/2}}{V_p} - 1\right)\frac{V_p}{M}$$

où :

$V_{1/2}$: volume d'effluent permettant l'élution de la moitié du soluté apporté dans la colonne,

V_p : volume des pores de la colonne,

M : masse d'adsorbant contenu dans la colonne.

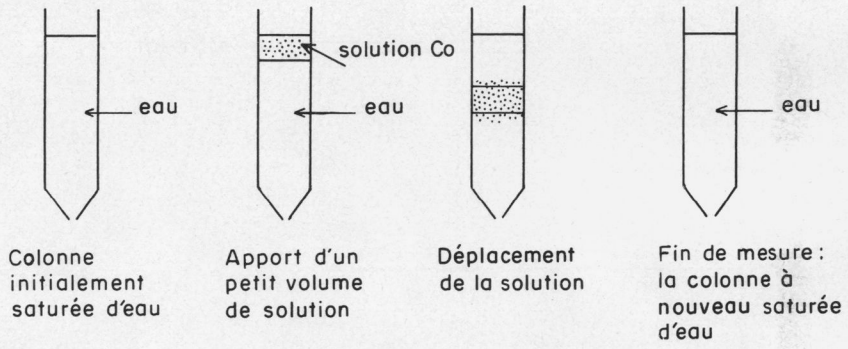
Cette formule suppose que :

— l'isotherme d'adsorption est linéaire,

— l'équilibre d'adsorption et de désorption est instantané,

— il n'y a pas d'hystérésis,

— il n'y a pas de phase liquide stationnaire dans la colonne. Il apparaît ainsi, compte tenu des caractéristiques de l'adsorption par les sols, que ce calcul n'est pratiquement jamais utilisable.



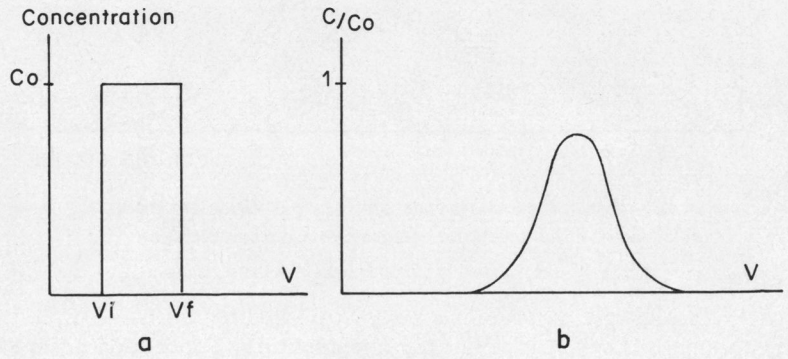


FIG. 3. — *Principe de la méthode de Swoboda.*

a) Variation de la concentration à l'entrée de la colonne. Un volume (V_f-V_i) de solution de concentration C_0 est apporté ; *b*) Pic d'élution. C = concentration de l'effluent ; V = volume écoulé.

Swoboda method principle.

2. *Mesures avec des suspensions.*

Grice et Hayes (1972) ont proposé une méthode permettant d'obtenir des isother-

mes d'adsorption et de désorption en continu avec une suspension. Celle-ci est contenue dans une cellule dont une extrémité est fermée par une membrane microporeuse (fig. 4*a*). La cellule est alimentée sous pression par une solution ou par de l'eau, la suspension étant continuellement agitée. L'analyse de l'effluent permet de tracer des courbes du type représenté dans la figure 4*b* :

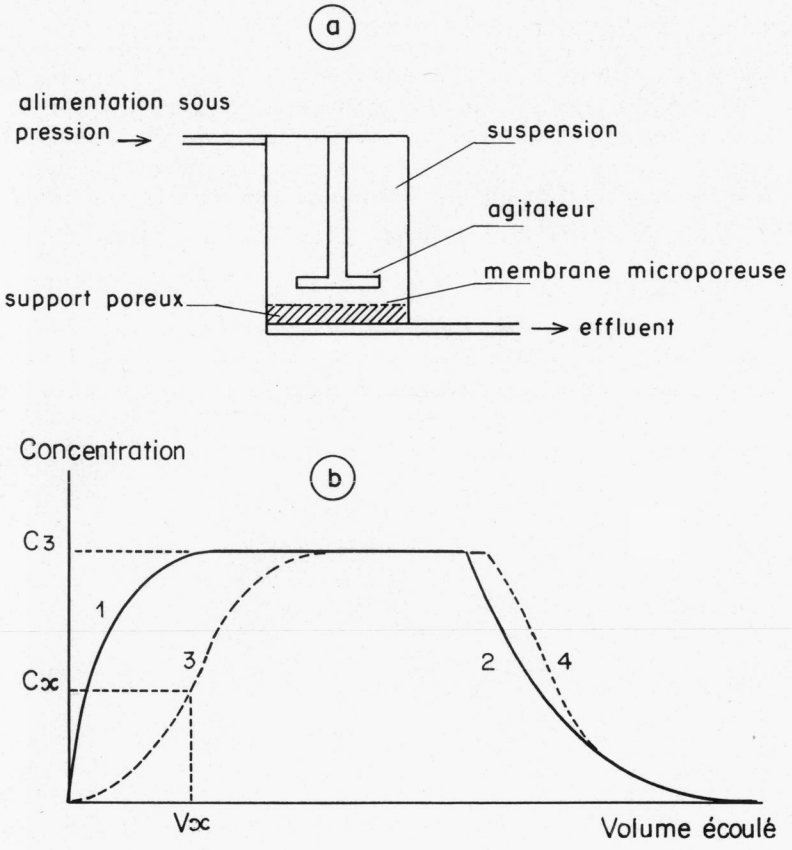


FIG. 4. — *Principe de la méthode proposée par Grice et Hayes.*
a) Schéma d'une cellule de mesure ; *b*) Courbes d'élution.
Principle of the method proposed by Grice and Hayes.

— déplacement de l'eau de la cellule par une solution en l'absence d'adsorbant (1) avec un adsorbant (3),

— déplacement d'une solution de la cellule par de l'eau en l'absence d'adsorbant (2) avec un adsorbant (4).

Le calcul de la quantité adsorbée est fait de la façon suivante : Soit C_x la concentration dans la cellule correspondant à un volume écoulé V_x. On a :

Quantité adsorbée = Quantité qui a pénétré dans la cellule — Quantité restant en solution dans la cellule — Quantité sortie de la cellule

$$= V_x C_s - V_c C_x - \int_0^{V_x} C \, dV$$

où

C_s = concentration de la solution pénétrant dans la cellule,

V_c = volume de la cellule,

C = concentration dans la cellule.

Outre le fait de permettre des mesures en continu, cette méthode permet de faire des mesures avec des suspensions très diluées. Elle présente par contre, les inconvénients suivants :

— la membrane microporeuse doit être inerte (pas d'adsorption ni de rejet de soluté),

— l'adsorbant doit rester en suspension,

— l'équilibre d'adsorption doit être instantané.

C. — *Conclusion*

La méthode la plus commode est celle qui utilise un mélange d'adsorbant et de solution avec une séparation par centrifugation ou par extraction sous pression. Son principal inconvénient réside dans le choix du rapport masse d'adsorbant/volume de solution, pour lequel il n'est pas encore possible de donner d'indications précises en raison du faible nombre de travaux relatifs à la comparaison de mesures faites dans différentes conditions expérimentales.

Il est certes souhaitable de pouvoir effectuer des mesures dans des conditions d'hydratation identiques à celles qui prévalent en plein champ et cela sans altérer la structure des agrégats du sol. Pour des milieux non saturés en eau quelques tentativent existent (Hance, 1977 ; Hance et Embling, 1979) et pour des milieux saturés en eau, la méthode proposée par Green et Corey (1972) semble la moins mauvaise. Il faut cependant reconnaître qu'actuellement nous ne disposons pas de moyens commodes et non ambigus d'étudier l'adsorption et la désorption sur des échantillons de sol non saturés en eau et non détruits.

III. — Caractérisation des molécules adsorbées

Les quantités de pesticide adsorbé étant déterminées, il peut être utile d'obtenir des informations sur les propriétés des molécules adsorbées, notamment pour :

— connaître leur localisation ;

— tenter d'identifier les liaisons responsables de l'adsorption ;

— détecter d'éventuelles transformations chimiques.

A. — *Désorption des molécules et étude de leurs propriétés*

La désorption des molécules par différents solvants appropriés et leur analyse à l'aide des méthodes chimiques, physiques et biologiques permet d'avoir des informations sur :

— la nature des liaisons dans l'état adsorbé,

— les transformations chimiques des molécules adsorbées.

Il est assez fréquent également d'étudier l'activité biologique des pesticides désorbés. Il ne s'agit pas cependant d'une étude directe de l'état adsorbé comme seules les méthodes suivantes peuvent le permettre.

B. — *Etude des molécules adsorbées par spectrométrie d'absorption*

La spectrométrie dans l'ultra-violet a été très peu utilisée en raison des difficultés rencontrées dans l'obtention des spectres d'absorption. Nous en avons cité un exemple à propos du paraquat (1re partie, § V.B.3). La spectrométrie dans le domaine infrarouge est par contre beaucoup plus utilisée (tabl. 1).

TABLEAU 1

Exemples de systèmes pesticide-adsorbant étudiés par spectroscopie d'absorption dans l'infrarouge
Examples of pesticide-adsorbant systems studied by infrared spectroscopy

Pesticide	Adsorbant	Milieu			Conditionnement			Auteurs
		Phase vapeur	Chloroforme	Eau	Huiles minérales	Films	Pastille KBr	
E.P.T.C.	Montmorillonites	×				×		Mortland et Meggitt, 1966
Triallate	Montmorillonites		×			×		Khan, 1973*b*
Diquat	Acides humiques			×			×	Khan, 1974
Paraquat								
Paraquat	Montmorillonite			×	×			Haque *et al.*, 1970
Triazines	Acides humiques			×			×	Sullivan et Felbeck, 1968
Triazines	Montmorillonites		×	×		×	×	Russel *et al.*, 1968
Triazines	Argiles de sol		×				×	Brown et White, 1969
Triazines	Montmorillonite		×			×		White, 1975
Atrazine	Montmorillonite			×		×		Tercé *et al.*, 1977
Urées	Montmorillonite			×		×		Farmer et Ahlrichs, 1969
Linuron	Montmorillonite		×			×		Khan, 1974
Linuron	Acides humiques		×				×	Khan et Mazurkewich, 1974
2,4-D	Montmorillonite		×			×		Dieguez Darbonell et Rodriguez Pascual, 1975

L'intérêt de ces études réside essentiellement dans le fait qu'elles permettent d'obtenir des indications sur la nature des liaisons adsorbat-adsorbant parfois sur l'orientation des molécules sur la surface des adsorbants et sur l'existence de transformations chimiques. Elles sont toutefois limitées :

— sur le plan technique par l'impossibilité fréquente d'obtenir des spectres d'adsorption utilisables en raison d'une diffusion de la lumière souvent trop importante due à la structure pulvérulente des échantillons,

— sur le plan de l'interprétation par la connaissance fréquemment incomplète des attributions des bandes d'absorption des molécules non adsorbées et par l'ignorance parfois totale des attributions des bandes des molécules adsorbées.

Nous citerons deux exemples pour illustrer l'apport de la spectroscopie d'adsorption infrarouge. Il s'agit tout d'abord des travaux de Russel *et al.* (1968), et Brown et White (1969) sur l'hydrolyse des triazines adsorbées (voir § I.A.2, 4e partie). Dans ce cas, les modifications spectrales observées permettent de mettre en évidence la transformation chimique des molécules. L'autre exemple se rapporte aux études de Mortland et Meggit (1966) sur l'adsorption de l'E.P.T.C. par des montmorillonites saturées par différents cations. La figure 5 permet de comparer le spectre d'absorption de ce

FIG. 5. — *Spectres d'absorption dans l'infrarouge de l'EPTC adsorbé sur des argiles.*
1) EPTC en solution ; 2) EPTC adsorbé sur une argile Al ; 3) EPTC adsorbé sur une argile Ca (Mortland, Meggit, 1966).

Infrared spectra of EPTC adsorbed on clays.
1) EPTC in solution ; 2) EPTC adsorbed on an Al-Clay ; 3) EPTC adsorbed on a Ca-Clay.

pesticide à l'état liquide et adsorbé sur des montmorillonites saturées par différents cations. La diminution de la fréquence de vibration du groupe carbonyl (vers 1 550-1 650 cm^{-1}) traduit l'existence d'une liaison de coordination avec les ions métalliques.

Comme le montre le tableau 1, les systèmes étudiés par spectroscopie infrarouge sont assez particuliers. Les seules argiles utilisées sont des montmorillonites en raison de leur capacité d'adsorption souvent élevée et de la possibilité de confectionner des films très fins et auto-porteurs. Il faut aussi remarquer que l'adsorption est fréquemment obtenue à partir de solutions chloroformiques. Les pesticides utilisés sont en effet plus solubles dans le chloroforme que dans l'eau et il est ainsi possible d'avoir des solutions de concentration élevée, donc une adsorption plus importante. On peut cependant s'interroger sur l'intérêt que de tels systèmes peuvent présenter par rapport au milieu naturel.

C. — *Diffraction des rayons X*

La diffraction des rayons X peut fournir des indications sur la localisation des molécules adsorbées sur des smectites. Quand les molécules sont situées dans l'espace interfoliaire, les caractéristiques cristallographiques des argiles sont modifiées. La valeur de la distance d_{001} est notamment augmentée. Le tableau 2 donne quelques résultats tirés des travaux de Knight et Denny (1970). Ils montrent que :

TABLEAU 2

Valeurs de la distance d_{001} d'une montmorillonite ayant adsorbé différentes quantités de paraquat (Knight et Denny, 1970)

d_{001} values of a montmorillonite with different amounts of adsorbed paraquat

Quantité de paraquat adsorbé en meq/100 g	d_{001} Å	
	Echantillon séché à 110 °C	Humidité relative 100 p. 100
0	9,6 (s)	15,5 (s)
3,9	9,9 (s) ; 11,6 (w)	15,5 (s)
7,8	9,9 (s) ; 11,7 (w)	15,5 (s)
19,5	12,1 (s) ; 10,1 (ms)	15,4 (s) ; 12,5 (mw)
27,8	12,1 (s) ; 10,6 (vw)	12,6 (s) ; 14,5 (m)
46,3	12,2 (s)	12,5 (s) ; 13,2 (vw)
58,6	12,6 (s)	12,6 (s) ; 13,4 (w)
68,6	12,6 (s)	12,8 (s)
76,7	12,6 (s)	12,8 (s)

Intensité des raies : s = forte ; ms = moyennement forte ; m = moyenne ; mw = moyennement faible ; w = faible ; vw = très faible.

— les molécules de paraquat sont effectivement localisées entre les feuillets de l'argile,

— compte tenu de sa taille, la molécule de paraquat est positionnée à plat sur les surfaces basales,

— la présence de paraquat empêche le gonflement de l'argile en présence de vapeur d'eau indiquant que les molécules organiques sont en interaction avec les

deux faces des feuillets qui limitent l'espace interfoliaire. Cette observation explique en partie le fait que cet herbicide soit très fortement retenu.

Russel *et al.*, (1978), Mortland et Meggitt (1966) ont également fait de semblables observations.

La diffraction des rayons X peut donc être une méthode intéressante mais son application est limitée aux argiles gonflantes.

Reçu pour publication en juillet 1980.

Remerciements

Nous remercions MM. R. J. Hance (Weed Research Organization, Oxford, England) et J. Lhoste (Roussel-Uclaf, Paris) pour l'aide qu'ils nous ont apportée dans la rédaction de ce mémoire.

Summary

Bibliographical review
Adsorption of pesticides by the soils and their constituents
V. — *Methods of adsorption study*

Treatments of adsorbents before measurements may have a marked influence on the results. Particularly, acidification and dehydration treatments may lead to important modifications of adsorption properties of soil colloïds.

Methods used to measure adsorption are based either on adsorbent solution mixtures with various proportions or on flow experiments with systems containing various amount of water. Measurement on suspensions are very numerous, but it is not the case for measurements with conditions similar to that existing in the field. This is due to the absence of convenient methods and this explains our lack of knowledge about the real expression of adsorption-desorption phenomena in natural media.

Analysis of characteristics of adsorbed molecules is only possible with adsorbent-pesticide systems able to be studied with spectroscopic methods and X-rays diffraction methods. Thus, the most part of information concerns pesticides adsorbed on smectites. These informations have permitted to identify some bonds between molecules and the surface of adsorbants, and to detect degradation phenomena.

Zusammenfassung

Klarstellung der Literaturangaben
adsorption des pflanzenschutzmittel durch die boden und ihre bestandteilex
V. — *Methoden fur die untersuchung der adsorption*

Die Behandlungen der adsorbierenden Materialien vor den Messungen können einen beträchtlichen Einfluss auf diese erzielten Ergebnisse haben. Das Ansäuern und die Entwässerung können die Adsorptionseigenschaften der Bodenkolloïden bedeutend ändern.

Die Methoden für die Adsorptionsmessung benutzen entweder Mischungen von Sorptionsmittel und Lösung in veränderlichen Verhältnissen oder Lösungsablauf in mehr oder weniger hydrierten Systemen. Die Messungen bezüglich der Suspensionen sind zahlreich im Gegensatz zu den Messungen, die unter den in Boden wirklichen Bedingungen nahen Bedingungen durchgeführt worden sind. Das ist von einer Abwesenheit von geeigneten Methoden bedingt und verursacht eine fast völlige Unkenntnis der Ausdrucksformen der Adsorptiondesorptionerscheinungen in natürlicher Umwelt.

Die Analyse der Merkmale der adsorbierten Molekülen ist vor allem zu Sorptionsmittel-Pflanzenschutzmittel Systemen begrenzt, die für die Untersuchung mit spektroskopischen Methoden oder Roentgenstrahlendiffraktion geeignet sind. Die meisten erzielten Daten betreffen deswegen Substanzen, die auf Smectiten adsorbiert worden sind. Sie haben es ermöglicht, gewisse Bindungen zwischen den Molekülen und der Oberfläche zu bestimmen und Abbauerscheinungen zu beweisen.

РЕЗЮМЕ

Адсорбция пестицидов в почвах и в составных частях почв.
Библиографическое обозрение.

5. — Методы изучения адсорбции.

КАЛЬВЕ Р., ТЕРСЕ М., АРВЬЁ Ж.

Обработка адсорбентов до измерений может оказать заметное влияние на результаты. Подкисление и дегидратация могут значительно изменить свойства адсорбции почвенных коллоидов.

Методы измерения адсорбции употребляют смеси адсорбента и раствора в разных отношениях или потоки раствора в разных гидратированных системах. Измерений растворов много, но мало измерений, сделанных в условиях близких к почвенным условиям. Это зависит от отсутствия приспособленных методов и является причиной незнания форм выражения явлений адсобции и десорбции в природных условиях.

Анализ свойств адсорбированных молекул сводится к системам « адсорбент-пестищид », которые можно изучить с помощью спектроскопии или рассеяния рентгеновских лучей. Из этого следует, что большая часть полученных результатов касается продуктов, адсорбированных на смектитах. Они позволили установить определённые связи между молекулами и поверхностью и выявить явления разрушения.

Références bibliographiques

ANDERSON D. M., 1966. Phase composition of frozen montmorillonite water mixtures from heat capacities measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **30,** 670-675.

BOWMAN B. T., 1975. Effects of method of clay preparation on subsequent adsorption of the insecticide fensulfothion. *Can. J. Soil Sci.* **55** (2), 105-110.

BROWN C. B., WHITE J. L., 1969. Reactions of 12 s. triazine with soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **33** (6), 863-867.

BRUNAUER, 1945. *The adsorption of gases and vapor.* I. — *Physical adsorption.* Princeton University Press.

BURNS I. G., HAYES M. H. B., STACEY M., 1973. Studies on the adsorption of paraquat on solubble humic fractions by gel filtration and ultrafiltration techniques. *Pest. Sci.* **4,** 629-641.

CALVET R., TERCÉ M., 1978. Effet de l'acidité sur l'adsorption de la terbutryne par la montmorillonite. *Communication présentée au groupe français des argiles* le 28 novembre 1978, Paris.

DIEGUEZ-CARBONELL D., RODRIGUEZ PASCUAL C., 1975. Adsorption of the herbicide 2.4. D by montmorillonite. *Env. Qual. Saf.*, Suppl. 3 pesticides, 237-242.

FARMER W. J., AHLRICHS J. L., 1969. I. R. Studies of the mechanism of adsorption of urea d4, methyl urea d_3 and 1-1 dimethyl urea d_2 montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **33** (2), 254-259.

FRIPIAT J., CHAUSSIDON J., JELLI A., 1971. *Chimie-physique des phénomènes de surface. Applications aux oxydes et aux silicates.* Masson et Cie Editeurs.

GAILLARDON P., CALVET R., TERCÉ M., 1977. Adsorption et désorption de la terbutryne par une montmorillonite Ca et des acides humiques seuls ou en mélanges. *Weed Res.* **17,** 41-48.

GREEN R. E., YAMANE V. K., 1970. Precision in pesticide adsorption measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **34,** 353-355.

GREEN R. E., COREY J. C., 1971. Pesticides adsorption measurement by flow equilibrium and subsequent displacement. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35,** 561-565.

GRICE R. E., HAYES M. H. B., 1972. A continuous flow method for studying adsorption and desorption of pesticides in soils and in colloid systems. *Proc. IIth Weed control conf.*, 784-790.

GROVER R., HANCE R. J., 1970. Effect of ratio of soil to water on adsorption of linuron and atrazine. *Soil Sci.* **109** (2), 136-138.

HANCE R. J., EMBLING S. J., 1979. Effect of soil water content at the time of application on herbicide content in soil solution extracted in a pressure membrane apparatus. *Weed Res.* **19,** 201-205.

HAQUE R., LILLEY S., COSHOW W. R., 1970. Mechanism of adsorption of diquat and paraquat on montmorillonite surface. *J. coll. Interf. Sci.* **3** (1), 185-188.

KHAN S. U., 1973*a*. Interaction of humic substances with bipyridylium herbicides. *Can. J. Soil Sci.* **53,** 199-204.

KHAN S. U., 1973*b*. Interaction of S-2, 3,3-trichloroallyl N,N-diisopropyl-thiolcarbamate (triallate) with montmorillonite. *J. Env. Qual.* **2** (3), 415-417.

KHAN S. U., 1974. Adsorption of bipyridylium herbicides by humic acid. *J. Env. Qual.* **3** (3), 202-206.
KHAN S. U., 1974. Adsorption of linuron by montmorillonite. *Can. J. Soil Sci.* **54** (2), 235-237.
KHAN S. U., MAZURKEWICH R., 1974. Adsorption of linuron on humic acid. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **118** (5), 339-344.
KNIGHT B. A. G., DENNY P. J., 1970. The interaction of paraquat with soil adsorption by an expanding lattice clay mineral. *Weed Res.* **10** (1), 40-49.
MORTLAND M. M., MEGGIT W. F., 1966. Interaction of ethyl N. N. Di n : propylthiocarbamate (EPTC) with montmorillonite. *J. Agr. Food Chem.* **14,** 126-129.
RUSSEL J. D., CRUZ M., WHITE J. L., BAILEY G. W., PAYNE W. R., POPE J. D., TEASLEY J. I., 1968. Mode of chemical degradation of triazines by montmorillonite. *Sci.* **160,** 1340-1342.
SAVAGE K. E., 1976. Adsorption and mobility of metribuzin in soil. *Weed Sci.* **24** (5), 525-528.
SAVAGE K. E., WAUCHOPE R. D., 1974. Fluometuron adsorption desorption equilibrium in soil. *Weed Sci.* **22** (2), 106-110.
SULLIVAN J. D., FELBECK G. T., 1968. A study of the interaction of s triazine herbicides with humic acids from three different soils. *Soil Sci.* **106** (1), 42-52.
SWOBODA A. R., THOMAS G. W., 1968. Movement of parathion in soil columns. *J. Agr. Food Chem.* **16** (6), 923-927.
TERCE M., LEFEBVRE DROUET E., CALVET R., 1977. Degradation of adsorbed atrazine on an aluminium montmorillonite. *Chemosphere* **11,** 753-758.
VAN DIJK H., 1971. *Colloid chemical properties of humic matter in soil biochemistry*, vol. 2, edited by Mc Laun A. D., Skujins J. Marcel Dekker, INC, New York.
WHITE J. L., 1975. Protonation and hydrolysis of s triazines by Ca montmorillonite as influenced by substitutions at the 2, 4 and 6 positions. *Proc. intern. clay conf.*, 391-397.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 429-454.

Caractérisation et évolution de la structure d'un couvert végétal de canne à sucre

C. VARLET-GRANCHER (1), R. BONHOMME (1), C. JACOB (2), P. ARTIS (3) et M. CHARTIER (4)

(1) *Laboratoire de Bioclimatologie, Domaine Brunehaut, I.N.R.A., Estrees-Mons, 80200 Péronne*

(2) *Laboratoire de Biométrie, Centre national Recherches zootechniques, I.N.R.A., 78350 Jouy en Josas*

(3) *Station de Bioclimatologie Centre de Recherches Agronomiques des Antilles et de Guyane, Domaine Duclos, I.N.R.A., 97170 Petit Bourg*

(4) *Station de Bioclimatologie, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A., 78000 Versailles*

Résumé

La structure d'une culture de canne à sucre a été caractérisée en supposant le couvert végétal horizontalement uniforme. Ainsi les paramètres « classiques » (hauteur de culture, indice foliaire, inclinaison...) qui permettent de quantifier l'importance et la géométrie de la végétation ont été mesurés tout au long du cycle de développement de la culture (fig. 1 et 6, tabl. 1 et 5). Des lois d'estimation de la surface et de description de la forme du limbe foliaire ont été établies (tabl. 2).

Les répartitions verticales de la surface des feuilles et de la géométrie ont été obtenues à différents stades (fig. 2 et 5, tabl. 3 et 4). Les ajustements de ces profils à l'aide de polynômes orthogonaux de degré 3 ou de fonctions du type « bêta » ont montré que la répartition de la surface foliaire entre les couches pouvait être évaluée de façon assez fiable, à partir de la hauteur de la culture (H), du déplacement de la voûte végétale (h_0), de l'indice foliaire de la culture (F_t) et d'une seule relation (fig. 3) pour tous les stades. Pour les profils des fréquences d'inclinaison de feuille, les lois utilisées ne sont pas stables au cours du développement de la culture. Il ne semble donc pas possible d'estimer la disposition verticale du feuillage (géométrie) de façon simple.

La précision de certaines mesures et estimations a été donnée (tabl. 6) et la dispersion de leurs valeurs testée (tabl. 7).

A partir d'un modèle très simplifié (« silhouette » d'une plante) l'hétérogénéité horizontale introduite par la disposition en rang a été estimée pour l'indice foliaire et l'inclinaison des feuilles (fig. 6).

Liste des symboles

N_t : nombre de tiges par unité de surface de sol (m^{-2}).

n_t : nombre de tiges sur 3 m de rang.

N_f : nombre de feuilles vertes entièrement déroulées par m^2 de sol.
n_f : nombre de feuilles vertes entièrement déroulées par tige.
H : hauteur de la culture.
H_t : hauteur de la tige.
F_f : indice foliaire (feuilles vertes).
F_t : unité de surface pour les tiges.
F_s : indice de surface pour les feuilles sèches.
F : indice de surface totale ou indice « foliaire » total.
s : fraction du ciel ou du sol vue au travers de la végétation.
s_{35} : fraction du ciel ou du sol vue au travers de la végétation pour une hauteur de visée de 35°.
i : inclinaison d'un morceau de limbe foliaire.
l : largeur en un point quelconque du limbe foliaire.
l_m : largeur maximale du limbe.
L : distance d'un point quelconque du limbe au point d'insertion sur la tige.
L_m : longueur totale du limbe.
S : surface du limbe.
z : niveau moyen d'une couche.
$\bar{i}$: inclinaison moyenne des feuilles pour l'ensemble de la végétation.
$P_{(i)}$: fréquence de la surface de feuille ayant une inclinaison i.
h_0 : niveau occupé par les feuilles sèches seules.
d : densité de feuille verte dans une couche : surface de feuille verte par m^3 de végétation.
D : densité de feuille verte pour l'ensemble de la végétation.

I. — Introduction

La disposition dans l'espace des éléments qui composent un couvert végétal conditionne les échanges radiatifs et turbulents non seulement au sein de la végétation elle-même, mais également entre la culture et son environnement (Chartier et Perrier, 1972). La structure du couvert végétal peut donc ainsi agir directement sur les grands processus physiologiques : photosynthèse (De Wit, 1965 ; Chartier, 1969 ; Monsi *et al.*, 1974), transpiration (Perrier, 1976)... et indirectement intervenir aussi dans les mécanismes de concurrence entre plantes (Jacquard, 1968). Inversement ces grandes fonctions peuvent modifier l'architecture de la végétation (Saeki et Kuroiwa, 1969 ; Jacquard, 1968).

L'analyse de la croissance d'un couvert végétal sur l'ensemble de son cycle de développement nécessite donc la caractérisation de sa structure et la connaissance de son évolution au cours du temps.

De nombreux modèles de pénétration de la lumière et de photosynthèse de la culture considèrent la végétation comme un ensemble d'éléments (plante, organe, partie d'organe...) indépendants, et la décrivent par leur distribution statistique (Nichiporovich, 1961 ; Ross et Vlasova, 1967 ; Lemeur et Blad, 1974...). Bien que cette démarche conduise à un assez grand nombre de simplifications, les mesures à effectuer restent importantes ; les espèces ainsi étudiées sont donc peu nombreuses et les variations de la structure au cours du temps rarement connues.

C'est pourquoi nous présentons ici, les données acquises sur des cultures de canne à sucre (*Saccharum officinarum*) étudiées dans le cadre de nos travaux sur l'analyse de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal (Varlet-Grancher *et al.*, 1978) et effectuées en Guadeloupe de 1973 à 1976.

II. — Caractérisation de la structure du couvert végétal

2.1. — *Méthodes et techniques*

Nous admettons que le couvert végétal est toujours horizontalement uniforme (on ne prend pas en compte la disposition en rang des plantes) et que les hétérogénéités sont distribuées de façon aléatoire dans la parcelle d'études (Ross et Vlasova, 1967). La culture sera donc affectée des caractéristiques moyennes calculées à partir des mesures effectuées en plusieurs endroits pris au hasard. Toutes les mesures sont rapportées à l'unité de surface du sol (1 m^2).

L'importance de la végétation a été caractérisée par des paramètres simples (nombre de plantes, nombre de feuilles vertes, hauteur de la culture, hauteur des tiges) et par l'indice foliaire. Le nombre de plantes par unité de surface de sol (N_t) correspond à la densité du peuplement et est obtenu à partir du comptage des tiges vivantes (n_t) sur une longueur de rang de 3 m (répété dix à vingt fois). Le nombre de feuilles vertes (N_f) est calculé à partir du dénombrement des feuilles (n_f) entièrement déroulées (okréa visible, Van Dillewijn, 1954) par tige (sur trente à cinquante tiges) et de N_t ($N_f = N_t \times n_f$). La hauteur de la culture (H en cm) est la moyenne (cinquante à cent mesures) des hauteurs maximales (distances entre le sol et la partie la plus élevée en l'absence de vent) des plantes en place. La hauteur de la tige (H_t en cm) correspond à sa longueur, de la surface du sol au méristème apical (moyenne sur trente à soixante tiges, mesures destructives).

L'indice foliaire a été défini par Watson (1947) comme la surface des feuilles vertes (une seule face est considérée) au-dessus d'une unité de surface de sol. Cette notion peut être appliquée aussi à la surface d'autres organes (Watson, 1952 ; Kvet et Marshall, 1971...). Nous avons considéré les indices suivants :

— F_f pour la surface de limbe des feuilles vertes,

— F_t pour la surface des tiges (entourées par les gaines foliaires),

— F_s pour la surface des feuilles sèches en place,

— F pour la surface totale de ces organes.

Le limbe de chaque feuille est découpé en morceaux de forme géométrique simple (triangle, trapèze, rectangle) dont on calcule la surface à partir de leurs dimensions. Pour les tiges et autres éléments cylindriques (« fouet foliaire »...) on ne considère (Kvet et Marshall, 1971) que la surface des sections longitudinales (produit longueur par diamètre).

Ces mesures faites sur un nombre connu de plantes servent, compte tenu de la densité de peuplement (N_t), à calculer F_f et F_t. L'indice foliaire total (F) est estimé à partir de photographies hémisphériques (Bonhomme, 1974 ; Bonhomme *et al.*, 1974). Cette technique permet d'obtenir la fraction (s) de ciel (appareil posé sur le sol, objectif dirigé vers le haut, cas d'une culture bien développée) ou de sol (appareil

placé au-dessus du couvert végétal, objectif vers le bas, cas d'une culture peu développée), vue à travers la végétation. Pour une hauteur de visée de 35°, cette fraction s_{35} est liée à F par une relation de type : $F = \alpha \log e\, s_{35}$. Le coefficient α a été calculé (Isobe, 1969...) pour un couvert végétal théorique (pour lequel on admet certaines hypothèses sur sa structure) et est égal à — 1,12. Pour la canne à sucre, sa valeur est différente (non respect des hypothèses) et peut être estimée par ajustement linéaire entre les mesures de F dans les premiers stades (où $F = F_t + F_f$) et $\log e\, s_{35}$. Pour trente observations effectuées sur les trois variétés étudiées nous avons obtenu $\alpha = -1{,}45$ ($R^2 = 0{,}94$), l'ordonnée à l'origine n'est pas significativement différente de zéro).

L'importance des feuilles sèches (F_s) est estimée à partir de F (obtenu par photographies hémisphériques) connaissant F_f et F_t (mesures directes).

A l'intérieur de la végétation, la répartition des éléments selon la verticale est très hétérogène. Pour rendre compte de cette hétérogénéité, la culture est représentée par un empilement de couches horizontales. Toutes les couches sont alors caractérisées par leur position (z = niveau moyen au-dessus du sol) et par les indices partiels : f_f, f_t, f_s et f. Les représentations graphiques de ces indices en fonction du niveau, permettent d'établir des profils ; les sommations des valeurs ainsi représentées, donnent les indices F_f, F_t, F_s et F relatifs à l'ensemble de la culture. Pour obtenir les indices partiels, les mesures sont effectuées à l'aide d'un cadre (en tubes emboîtables) placé « à cheval » au dessus du rang sur une longueur de 1 m (ce qui correspond, compte tenu de l'écartement des rangs, à une surface au sol de 1,5 m^2), et qui délimite des couches de 50 cm d'épaisseur dans un volume de végétation, correspondant à un parallélépipède rectangle. Les mesures sont effectuées sur trois à cinq sites déterminés au hasard.

La description de la géométrie d'une culture est obtenue par la connaissance de l'inclinaison, de l'azimut et de la position (hauteur au-dessus du sol) de chaque élément composant la végétation. Le couvert végétal étant divisé en couches, il est commode de donner à tous les éléments d'une même couche, la hauteur moyenne de celle-ci. Les feuilles d'une tige de canne à sucre se répartissent à peu près sur un même plan vertical (Van Dellewijn, 1954). Nous avons admis que ce plan pouvait avoir toutes les orientations avec la même probabilité, et qu'il en était donc de même pour l'azimut des feuilles.

Nous avons donc seulement mesuré, l'inclinaison des feuilles et des tiges pour les couches délimitées de la même façon que précédemment (cadre en tubes). Les limbes foliaires sont considérés comme un ensemble de morceaux plans placés bout à bout ; chaque morceau est repéré avant d'être découpé, et son inclinaison (i par rapport à l'horizontale) est mesurée à l'aide d'un rapporteur muni d'un fil à plomb (Chartier, 1969...). Pour simplifier les prélèvements, les parties de limbe et de tige d'une même couche sont regroupées selon des classes d'inclinaison (de 15 ou de 30°) puis leur surface mesurée.

Ces mesures ont été effectuées principalement sur trois variétés : PR 1059, HJ 5741, B 64277 cultivées à la station de bioclimatologie du C.R.A.A.G. * du Domaine Duclos en Guadeloupe (16° Nord, 62° Ouest). La plantation a eu lieu le 12 juin 1975

* Centre de Recherche Agronomique des Antilles et de la Guyane, I.N.R.A.

sur des parcelles d'une surface de 600 à 800 m², les rangs orientés nord-sud étaient espacés de 160 cm ; la récolte a été faite le 17 mai 1976. Les cultures ont été conduites selon les techniques classiques mais optimales (fumure, irrigation en début de culture) définies pour la région (Lemaire et Robert, 1973). Quelques données similaires ont été obtenues de 1973 à 1975 sur une plantation et une repousse de PR 1059 à Duclos et sur des repousses de diverses variétés (Q 78, B 6898...) en différentes stations d'essais du C.T.C.S. * (La Retraite, Gardel...). Les principales caractéristiques climatiques pour les cultures les plus importantes sont données en annexe.

2.2. — *Résultats*

2.21. *Importance de la culture.*

Le tableau 1 donne pour trois variétés (PR 1059, HJ 5741, B 64277) au même stade (160 jours après plantation) les valeurs des caractéristiques définies précédemment.

TABLEAU 1

Importance du couvert végétal : valeur des paramètres caractéristiques pour trois variétés 160 jours après la plantation (1975-1976)

Phytometric characteristics for sugarcane stands 160 *days after plantation*

	PR 1059	HJ 5741	B 64277
F ($m^2 . m^{-2}$)	5,2	5,2	4,75
F_f ($m^2 . m^{-2}$)	4,4	4,2	4,0
F_t ($m^2 . m^{-2}$)	0,5	0,5	0,30
F_s ($m^2 . m^{-2}$)	0,3	0,5	0,45
H (cm)	302 $\pm$ 3	313 $\pm$ 4	269 $\pm$ 5
N_t	11,8 $\pm$ 0,7	8,7 $\pm$ 0,7	9,2 $\pm$ 0,7
N_f	97 $\pm$ 8	86 $\pm$ 7	74 $\pm$ 6

Moyenne sur trois mesures pour la valeur des indices F et moyenne $\pm$ $t_{0,05}$ $\times$ écart-type sur la moyenne (trente à cinquante mesures) pour les autres paramètres.

Les indices F, F_f, F_t, F_s et la hauteur (H) diffèrent relativement peu pour les trois cultures. Les feuilles sèches ont une importance non négligeable (F_s de 0,3 à 0,5) qui augmente avec le développement de la culture (cf. fig. 1). Cette évolution correspond à un caractère général de l'espèce. La durée de vie de chaque feuille (110 à 150 jours pour PR 1059) est plus courte que celle de la culture (340 jours), et le nombre de feuilles portées par une tige pendant tout son développement (25 environ pour PR 1059) est plus important que le nombre de feuilles actives observé à un stade donné (8,2 pour PR 1059, 160 jours après plantation). Les tiges ne représentent pas plus de 10 à 15 p. 100 de la surface des feuilles vertes. La combinaison de la densité du peuplement (N_t) et du nombre de feuilles par tige ($n_f = 8,1$ pour B 64277, 8,2 pour PR 1059 et 9,9 pour HJ 5741 au stade du tableau 1) conduit à un nombre de feuilles N_f différent pour les

* Centre Technique de la Canne et du Sucre, Guadeloupe.

trois cultures. L'indice foliaire correspondant F_f étant assez voisin, la surface moyenne des feuilles diffère donc plus fortement entre ces trois variétés, comme le confirment des mesures individuelles effectuées sur d'autres cultures (cf. tabl. 2.1). Les feuilles de

TABLEAU 2

Paramètres caractéristiques des feuilles
(site expérimental de la Retraite)

Leaf characteristics

2.1. Surface et dimensions du limbe : culture de 200 jours.

2.1. Area and mensurations of blade.

Variété	PR 1059	HJ 5741	B 64277
Surface S (cm^2)	517 ± 30	576 ± 10	617 ± 22
Longueur : L_m (cm)	151,0 ± 2,0	156,3 ± 1,6	167,0 ± 2,4
Largeur maximale l_m (cm)	5,1 ± 0,1	5,0 ± 0,1	5,6 ± 0,2
Nombre de mesures	142	116	99

2.2 Forme du limbe : variation de la largeur (l) en fonction de la distance au point d'insertion sur la tige (L) : ajustement du type :

$$l/l_m = a + b\,(L/L_m) + c\,(L/L_m)^2 + \varepsilon\,.$$

2.2. Variations of blad width (l) in relation to the distance from insertion point on the stalk (L).

	Valeur des coefficients a	b	c	Nbre de mesures N	Coef. de corrélation R	Précision * sur l'estimation de l/l_m (pour le point $L/L_m = 0,5$) p. 100
Variété PR 1059						
Feuilles n_o 1	0,55	2,14	— 2,73	44	0,99	13
Feuilles n° 2	0,59	1,98	— 2,62	45	0,98	16
Feuilles n° 3	0,55	2,11	— 2,67	46	0,98	15
Feuilles n° 4	0,56	2,06	— 2,63	47	0,97	17
Feuilles n° 5	0,55	2,16	— 2,72	49	0,98	15
Feuilles n° 6	0,57	2,13	— 2,70	49	0,98	15
Feuilles n° 7	0,58	2,12	— 2,79	48	0,98	16
Feuilles n° 8	0,63	1,91	— 2,53	44	0,97	17
Feuilles n°s 9 et 10	0,63	1,87	— 2,47	43	0,95	21
Toutes feuilles confondues						
PR 1059	0,58	2,06	— 2,65	347	0,97	15
B 6898	0,49	2,39	— 3,03	419	0,94	19
Q 78	0,55	2,12	— 2,75	433	0,93	20
B 64277	0,57	2,09	— 2,68	458	0,94	18
HJ 5741	0,66	1,82	— 2,46	431	0,95	17
Toutes variétés confondues	0,57	2,09	— 2,71	2 088	0,93	20

* $100 \times t_{0,05} \times$ (écart-type de la prédiction d'un l/l_m isolé à partir de $L/L_m = 0,5$) Snedecor et Cochran, 1971 p. 437.

TABLEAU 2 (*suite*)

2.3. Estimation de la surface d'une feuille : corrélation entre la surface (S) et le produit de la longueur totale (L_m) par la largeur maximale (l_m) du limbe :

$$S = a + bL_m \times l_m + \varepsilon$$

S en cm^2, L_m et l_m en cm.

2.3. Estimation of leaf area : relation between area (S) and the product of blad lenght (L_m) by maximum width (l_m).

	Valeur des coefficients a	b	Coef. de corrélation R	Nbre de mesures	Précision ** sur l'estimation de S (en p. 100)
Variété PR 1059 toutes feuilles confondues					
• stade cinq à six feuilles par tige ($F_f \neq 2$)	1,2 *	0,74	0,99	234	12,1
• stade neuf à dix feuilles par tige ($F_f \neq 6,8$)	— 39,4 *	0,82	0,99	142	6,2
• stade dix à onze feuilles ($F_f \neq 7,5$)	— 53,2 *	0,77	0,94	45	8,2
Tous stades confondus					
• PR 1059	— 1,0 *	0,75	0,99	421	11,3
• B 6898	8,5 *	0,67	0,96	125	9,8
• Q 78	— 44,8 *	0,75	0,87	126	12,1
• B 64277	— 22,4 *	0,74	0,95	99	11,2
• HJ 5741.....	100,1	0,61	0,87	116	9,4
Toutes variétés.....	11,3	0,70	0,98	887	13,3

* Coefficient a non significativement différent de zéro au seuil de 5 p. 100.
** $100 \times t_{0,05} \times$ écart-type de la prédiction d'un S isolé à partir du produit ($L_m \times l_m$ moyen)/S. Snedecor et Cochran, 1971, p. 171.

B 64277 sont à la fois plus longues et plus larges. Ces différences de mensurations affectent peu la forme du limbe. Celle-ci peut être décrite par les variations de la largeur (l) en fonction de la distance (L) au point d'insertion sur la tige, et représentée en traçant l'évolution de l/l_m (l_m : largeur maximale) en fonction de L/L_m (L_m : longueur totale de la feuille). Les ajustements quadratiques diffèrent assez peu pour les feuilles d'une même variété. Les écarts entre variétés sont plus importants (tabl. 2.2). L'estimation de la surface du limbe à partir du produit de sa longueur par sa largeur maximale ($L \times l_m$) montre les mêmes tendances. Toutefois, il est possible de considérer la même relation pour toutes les feuilles tout en gardant une précision satisfaisante et bien que les différences puissent être significatives (tabl. 2.3).

Le tableau 3 donne la répartition des surfaces de feuilles vertes, de tiges et de feuilles sèches entre les différentes couches pour les variétés PR 1059, HJ 5741 et B 64277, 160 jours après la plantation et montre bien la répartition très inégale de l'appareil photosynthétique puisque 65 à 75 p. 100 des feuilles vertes se situent dans deux couches seulement (150-250 pour PR 1059 et HJ 5741, 100-200 pour B 64277).

TABLEAU 3

Répartition des indices F, F_f, F_t et F_s entre les différentes couches pour les trois variétés PR 1059, HJ 5741 et B 64277, au stade 160 jours après plantation

Vertical distribution of area index for green leaves (F_f), stalks (F_t), dry leaves (F_s) and « total area index » (F) for three sugar-cane crops (var. PR 1059, HJ 5741, B 64277), 160 days after plantation

Variétés	Indices	Couche niveau inférieur-supérieur en cm au-dessus du sol							Toute la culture
		0/50	50/100	100/150	150/200	200/250	250/300	300/350	
PR 1059	f_f	0	0,07	0,58	1,51	1,76	0,52		$F_f = 4,44$
	f_t	0,15	0,13	0,12	0,09				$F_t = 0,49$
	f_s	0,13	0,08	0,05	0,01				$F_s = 0,27$
	f	0,28	0,28	0,75	1,61	1,76	0,52		F = 5,20
HJ 5741	f_f	0	0,09	0,78	1,36	1,33	0,56	0,07	$F_f = 4,20$
	f_t	0,16	0,14	0,14	0,07				$F_t = 0,50$
	f_s	0,24	0,16	0,10					$F_s = 0,50$
	f.....	0,40	0,49	1,02	1,43	1,33	0,56	0,07	F = 5,20
B 64277	f_f	0,03	0,28	0,93	1,86	0,78	0,09		$F_f = 3,97$
	f_t	0,13	0,12	0,08					$F_t = 0,33$
	f_s	0,21	0,12	0,08	0,04				$F_s = 0,45$
	f.....	0,37	0,52	1,09	1,90	0,78	0,09		F = 4,75

2.22. *Géométrie de la culture.*

Le tableau 4 donne la géométrie d'une culture bien développée (variété HJ 5741, 140 jours après plantation $F_f = 4,7$). Pour chaque couche nous avons indiqué la répar-

TABLEAU 4

Répartition de la surface de feuilles vertes (en fréquence) *selon trois classes d'inclinaison par couches et pour toute la végétation, variété HJ 5741, 140 jours après plantation*

Distribution of green leaf area between three inclination classes (0-30, 30-60, 60-90°), *green leaf area index* (f_f) *and mean leaf inclination for each horizontal layer of a HJ 5741 stand 140 days after plantation*

Couche (cm)	Classe d'inclinaison			Indice foliaire f_f de la couche	Inclinaison moyenne degré
	0-30	30-60	60-90		
0-50	—	—	—	0	—
50-100	0,175	0,597	0,228	0,50	46
100-150	0,158	0,485	0,357	1,15	51
150-200	0,088	0,269	0,643	1,58	62
200-250	0,064	0,229	0,707	1,10	64
250-300	0,222	0,390	0,388	0,27	50
Toute la culture	0,117	0,356	0,527	4,60	57

tition de la surface foliaire en fréquence selon trois classes d'inclinaison (0-30, 30-60, 60-90°), l'inclinaison moyenne et l'indice foliaire f_f. La dernière ligne donne les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble de la végétation.

Les couches inférieures ont une géométrie moins dressée, due à une plus forte fréquence des feuilles obliques (classe 30-60°). Ces couches contiennent les feuilles les

plus âgées dont les gaines se détachent progressivement de la tige, leur donnant ainsi un port plus horizontal.

L'inclinaison moyenne relativement plus faible de la couche supérieure ($i = 50^o$) est due à une plus grande proportion de feuilles faiblement inclinées (P_i (0-30) plus élevée) et peut s'expliquer par la présence des parties horizontales correspondant aux courbures des feuilles des couches plus basses.

Les mesures directes de géométrie et les lois de variation de la largeur du limbe (§ 2.21) ont été utilisées par ailleurs (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1978) pour établir une méthode d'estimation de la géométrie applicable aux graminées de ce type (maïs, riz, blé...).

III. — Evolution de la structure

3.1. — *Importance de la culture*

La figure 1 donne l'évolution des indices F, F_f, F_t et F_s (cf. § 2.1) pour la variété PR 1059 (plantation 1975-1976).

La surface des feuilles vertes (F_f) croît fortement jusqu'à une valeur maximale atteinte 120 jours environ après la plantation puis diminue lentement vers une valeur qui reste sensiblement constante jusqu'à la récolte.

Les variations de F_f résultent de la croissance de chaque feuille et de l'évolution du nombre de feuilles vertes par unité de surface de sol (N_f). La surface finale de chaque limbe augmente avec l'ordre d'apparition de la feuille jusqu'à un maximum puis devient plus petite (Van Dillewijn, 1954). L'évolution de N_f au cours du temps, résulte de celle du nombre de feuilles par tige n_f et de la densité des tiges N_t. En fait, n_f augmente rapidement puis reste constant sur tout le cycle (le nombre de feuilles qui se dessèchent étant égal à celui des feuilles nouvellement formées), alors que N_t est beaucoup plus instable (courbe 5, fig. 1), et est principalement responsable des variations de N_f. Ainsi le tallage est un facteur important de l'évolution de l'indice foliaire.

Le système foliaire est constamment renouvelé au cours du cycle ; les feuilles âgées se dessèchent en place sur la tige et ont une surface (F_s) qui augmente jusqu'à 210 jours puis reste constante (les premières feuilles sèches se détachent alors de la tige au fur et à mesure du vieillissement des autres feuilles).

La surface d'interception correspondant aux tiges F_t, augmente d'abord fortement entre 60 et 120 jours puis lentement et par paliers successifs jusqu'à la récolte ; avant 60 jours la tige reste souterraine.

L'indice foliaire total $F = F_f + F_s + F_t$ augmente donc très fortement jusqu'à 120 jours puis reste sensiblement constant. Des variations analogues ont été obtenues pour les variétés B 64277 et HJ 5741.

L'importance de la végétation peut être caractérisée par la hauteur (H) de la culture (courbe 3, fig. 1). Ce paramètre permet de définir l'épaisseur de végétation prise en compte dans la modélisation du couvert végétal la plus courante (Ross et Vlasova, 1967...) ; il peut être aussi utilisé pour étudier la croissance de la culture (Heady, 1957).

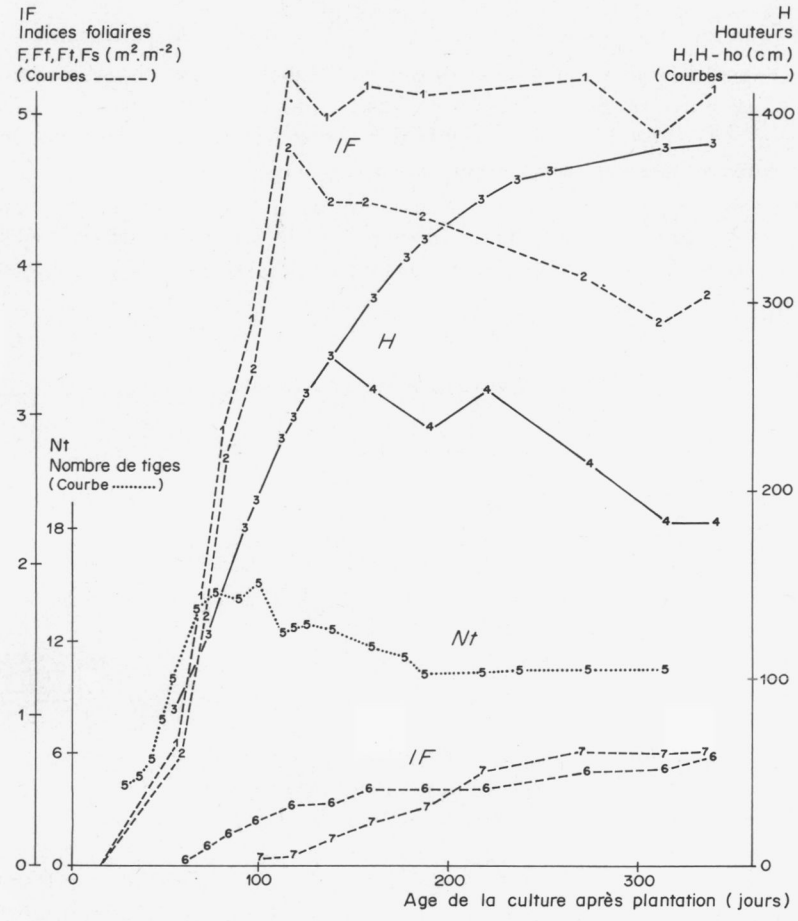


FIG. 1. — *Evolution de quelques paramètres caractéristiques de la structure d'une culture de canne à sucre* (variété PR 1059, saison 1975-1976) *au cours de son développement* (en jours après plantation). Courbes 1 : Indice « foliaire » total F ; 2 : Indice foliaire F_f ; 3 : Hauteur de la culture H ; 4 : Epaisseur de végétation photosynthétiquement active ($H - h_0$) ; 5 : Nombre de tiges par m^2 de sol N_t ; 6 : Indice de surface des tiges F_t ; 7 : Indice de surface de feuilles sèches F_s.

Evolution of phytometric characteristics for sugarcane stand (var. PR 1059) *during growing season, in days after plantation.*
Curves 1 : « Total leaf area » index : F ; 2 : Green leaf area index : F_f ; 3 : Depth of photosynthetically active vegetation : ($H - h_0$) ; 4 : Number of stalks by square meter of soil : N_t ; 5 : Stalk area index : F_t ; 6 : Dry leaf area index : F_s.

Bien que la hauteur de la culture telle qu'elle a été définie (cf. § 2.1) résulte à la fois de la longueur de la tige, et de la taille (longueur) et de la disposition des feuilles (port de la plante, en particulier des feuilles les plus jeunes), l'évolution de H correspond à la croissance de la longueur de tige (H_t, évolution non représentée), au décalage d'origine près (50 à 60 jours entre l'apparition des premières feuilles et celle des tiges à la surface du sol). La valeur de H étant plus facile à obtenir que celle de H_t (mesures destructives) il peut être éventuellement intéressant d'utiliser ce paramètre comme indicateur de la croissance en longueur de la tige.

Le dessèchement des feuilles les plus basses se traduit par un déplacement apparent des parties vertes vers le haut de la culture, l'épaisseur de végétation photosynthétiquement active ne correspond alors plus à la hauteur H mais est donnée par $H - h_0$ (courbe 4, fig. 1) ; h_0 étant le niveau au-dessous duquel on ne trouve plus que des feuilles sèches. La diminution de la surface des feuilles vertes (F_f, courbe 2) est compensée par celle de $H - h_0$ pour maintenir dans la partie active du couvert végétal une densité de feuilles vertes ($D = F_f/(H - h_0)$) * (évolution non représentée),

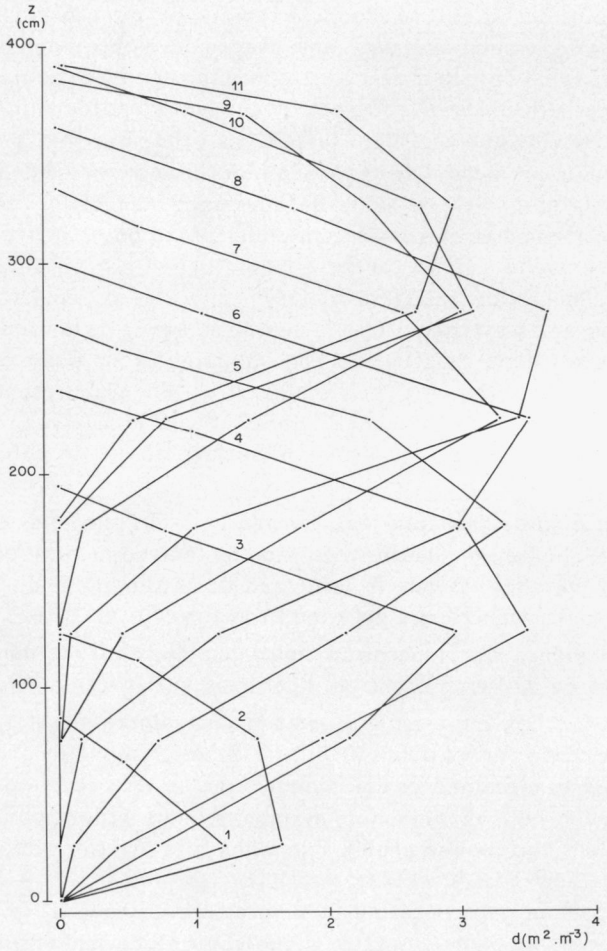


FIG. 2. — *Evolution des profils donnant la répartition verticale de la surface foliaire au cours du temps, densité de feuille de chaque couche* (d) *en fonction de son niveau moyen en ordonnée.* Variété PR 1059, saison 1975-1976.

Nombre de jours après plantation : courbe 1 : 57 ; 2 : 71 ; 3 : 99 ; 4 : 118 ; 5 : 138 ; 6 : 159 ; 7 : 187 ; 8 : 212 ; 9 : 272 ; 10 : 312 ; 11 : 339.

Profile of leaf area density (d, $m^2.m^3$) *in function of mean height* (Z) *of layer.* Evolution during growing season (var. PR 1059), in days after plantation.

* $(H - h_0)$ est exprimé en m pour obtenir D en m^2/m^3.

à peu près constante. Des résultats analogues ont été obtenus avec les deux autres variétés HJ 5741 et B 64277.

La répartition verticale de l'appareil photosynthétique varie avec le développement de la culture. La figure 2 donne l'évolution des profils obtenus en portant la densité de feuilles vertes (d) de chaque couche en abscisse et son niveau moyen (z) en ordonnée, pour la variété PR 1059 (saison 1975-1976). Ces profils ne sont pas uniformes et présentent une couche plus dense dont la position par rapport aux autres détermine une répartition dissymétrique. Cette densité maximale correspond d'abord à des couches plus basses puis se situe très rapidement dans la moitié supérieure du profil. La valeur de ce maximum augmente avec le développement de la culture (profils 1 à 3) puis se stabilise autour de 3 à 3,5 m^2/m^3 (profils 4 à 8) pour diminuer légèrement en fin de cycle (profil 9 à 11). On obtient des évolutions identiques pour les variétés B 64277 et HJ 5741 cultivées dans les mêmes conditions. Nous avons recherché une loi de variation permettant de décrire la répartition verticale de l'appareil photosynthétique quels que soient le stade de développement et la variété. Les profils précédents sont normalisés en considérant seulement la partie active de la végétation $(H - h_0)$ dans laquelle chaque couche est positionnée par sa distance $(H - z)$ au sommet de la culture (Ross et Vlasova, 1967) rapportée à l'épaisseur $(H - h_0)$. La densité de la couche : d est rapportée à la densité moyenne de la végétation active : D. Chaque couche est donc caractérisée par un point ayant pour ordonnée d/D et pour abscisse $(H - z)/(H - h_0)$. Les profils ainsi obtenus présentent deux points particuliers ; le sommet de la culture : $X = 0$, $Y = 0$ et le niveau à partir duquel on trouve des feuilles vertes $X = 1$, $Y = 0$ (surface du sol en début de cycle, puis $Z = h_0$).

Deux types d'ajustement ont été considérés : l'ajustement à la fonction β $(y = kx^{\alpha}(1 - x)^{\beta} + \varepsilon)$ et un ajustement polynomial (polynôme orthogonal de degré 3). Les calculs ont été effectués par la technique du « Maximum de Vraisemblance » à l'aide du logiciel « Maximum Likelihood Program » (Vila, 1976).

En toute rigueur, la comparaison statistique des courbes ainsi ajustées pour différents stades de développement ou différentes variétés, n'est pas possible.

En effet, la fonction β qui est le modèle le plus adapté aux données (puisque la courbe associée passe par les points (0, 0) et (1, 0) est un modèle non linéaire en fonction des paramètres à estimer, ce qui implique que les tests statistiques de comparaison des ajustements ne sont valables qu'asymptotiquement (donc pour un grand nombre d'observations sur chaque profil). Par ailleurs la transformation logarithmique de ce modèle ($\text{Log } Y = K + \alpha \text{ Log } x + \beta \text{ Log } (1 - x) + \varepsilon^*$, $x \neq 0$, $1 - x \neq 0$) linéarise le problème mais nécessite la suppression des points $x = 0$ et $x = 1$. Le nombre d'observations restantes (2 à 6 par courbe) devient insuffisant pour une comparaison statistique fiable.

Nous avons utilisé alors un ajustement polynomial de degré 3

$$(y = bx + cx^2 + dx^3 + \varepsilon^{**})$$

contraint de passer le plus près possible du point (1, 0) par pondération de ce point de la valeur 1 000 (contre 1 pour les autres points). Ce modèle est linéaire en fonction des paramètres mais les tests de comparaison de courbe nécessitent la normalité des lois des écarts ε^{**} entre les valeurs ajustées et observées et l'homogénéité de leur

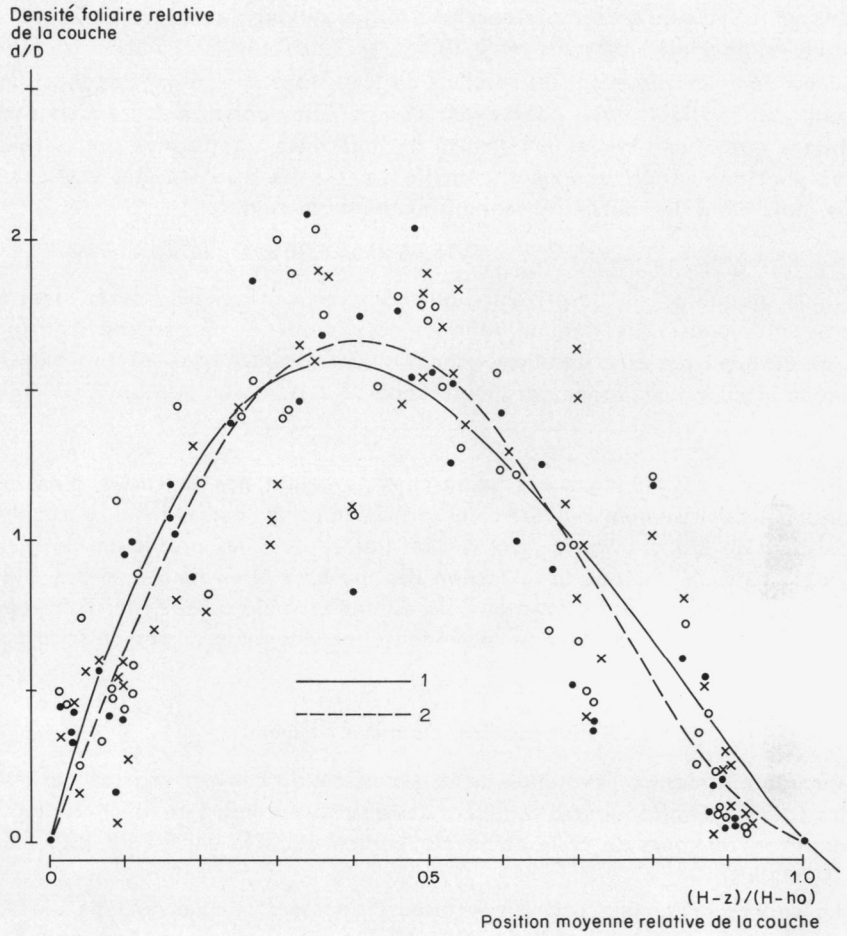


FIG. 3. — *Ajustements globaux des profils de répartition de la surface foliaire pour toutes les mesures effectuées sur les trois variétés PR* 1059, *HJ* 5741 *et B* 64277 : *densité relative d/D en fonction de la position moyenne relative de la couche dans la végétation active* $(H - z)/(H - h_0)$.

Points : valeurs mesurées pour la variété B 64277 ; Cercles : valeurs mesurées pour la variété PR 1059 ; Croix : valeurs mesurées pour la variété HJ 5741. Courbe 1 : ajustement polynôme orthogonal de degré 3 :

$$d/D = 9{,}27\,\frac{H - z}{H - h_0} - 15{,}96\left\{\frac{(H - z)}{(H - h_0)}\right\}^2 + 6{,}70\left\{\frac{(H - z)}{(H - h_0)}\right\}^3 + \varepsilon\,.$$

Courbe 2 : ajustement fonction béta :

$$d/D = 12{,}29\left\{\frac{(H - z)}{(H - h_0)}\right\}^{1{,}20} \cdot \left\{1 - \frac{(H - z)}{(H - h_0)}\right\}^{1{,}77}.$$

Vertical distribution of leaf area for three varieties (PR 1059, HJ 5741, B 64277) *during growing season* : *fitting to a common curve.*

Leaf area density of layer (d) on mean leaf area density (D) of photosynthetically active vegetation (ordonate) in relation of normalized mean height of layer $((H - z)/(H - h_0))$.
Points : measured values for B 64277 ; Circles : measured values for PR 1059 ; Crosses : measured values for HJ 5741 ; Curve 1 : fitting to an orthogonal polynomial function of degree 3. Curve 2 : fitting to a beta function.

variance. La première condition ne peut être vérifiée (insuffisance du nombre d'observations) et la seconde n'est pas respectée puisque autour des points (0, 0) et (1, 0) la variance est plus faible ou nulle (en 0, 0).

C'est donc en admettant les résultats de tests statistiques dont l'application n'est pas entièrement fiable, que nous avons comparé les polynômes, et c'est dans ces conditions que nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les profils ajustés pour une variété donnée ni pour l'ensemble des trois variétés étudiées. Nous avons alors établi la courbe moyenne décrite par la relation :

$$d/D = 9{,}27\,x - 15{,}96\,x^2 + 6{,}70\,x^3 + \varepsilon\,.$$

Pour chaque profil, l'écart entre polynôme et fonction béta étant assez faible, nous avons supposé que, comme pour les polynomes les ajustements à la fonction béta ne devaient pas être significativement différents entre eux, et nous avons ainsi calculé le profil moyen donné par l'expression :

$$d/D = 12{,}29\,x^{1{,}20}\cdot(1 - x)^{1{,}77}\,.$$

Bien que statistiquement ces démarches ne soient pas correctes (non fiabilité des tests), l'établissement des formules précédentes et leur utilisation nous paraît intéressante du fait des écarts relativement faibles avec les profils observés (fig. 3) et compte tenu du manque de précision des mesures elles-mêmes et des difficultés pour les obtenir. De plus, la fonction béta est une formule assez générale qui pourra être facilement introduite dans toute modélisation des mécanismes de la croissance de la culture.

3.2. — *Géométrie du couvert végétal*

La figure 4 montre l'évolution de la géométrie du couvert végétal, caractérisée par les courbes des fréquences cumulées de la surface foliaire en fonction des classes d'inclinaison, au cours du cycle de développement pour la variété PR 1059 (courbes avec symboles).

La culture présente d'abord une disposition assez proche du type plagiophile (courbe A en trait plein d'après De Wit, 1965), puis devient rapidement sphérique (courbe B en trait plein d'après Nichiporovich, 1961) et enfin érectophile (courbe C en trait plein, d'après De Wit, 1965), 120 jours environ après plantation. L'inclinaison moyenne de la végétation varie donc de façon importante : entre 42 et 66°. Les évolutions sont analogues pour les variétés B 64277 et HJ 5741 (tabl. 5).

Les courbes numérotées (tracées en tirets) donnent les géométries obtenues sur des végétations bien développées de Q 78 (courbe 1, $\bar{i} = 48°$, $F_f = 5{,}2$) et de B 6898 (courbe 2, $\bar{i} = 76°$, $F_f = 3{,}7$). Ces deux cultures représentent la gamme de variation de géométrie la plus large pour les variétés disponibles en Guadeloupe, cependant pour les variétés effectivement cultivées (PR 1059, HJ 5741 et B 64277) l'inclinaison moyenne varie peu pour un même stade (tabl. 5).

Pour tenir compte de l'hétérogénéité verticale (cf. tabl. 4) dans l'évolution de la géométrie du couvert végétal, nous avons représenté (fig. 5) pour chaque classe d'inclinaison, la fréquence $P_{(i)}$ de la surface foliaire en fonction du niveau moyen normalisé $(H - z)/(H - h_0)$ (cf. § 3.1) pour chaque courbe. A un stade donné et en considérant trois classes d'inclinaison (0-30, 30-60, 60-90°), nous avons donc trois pro-

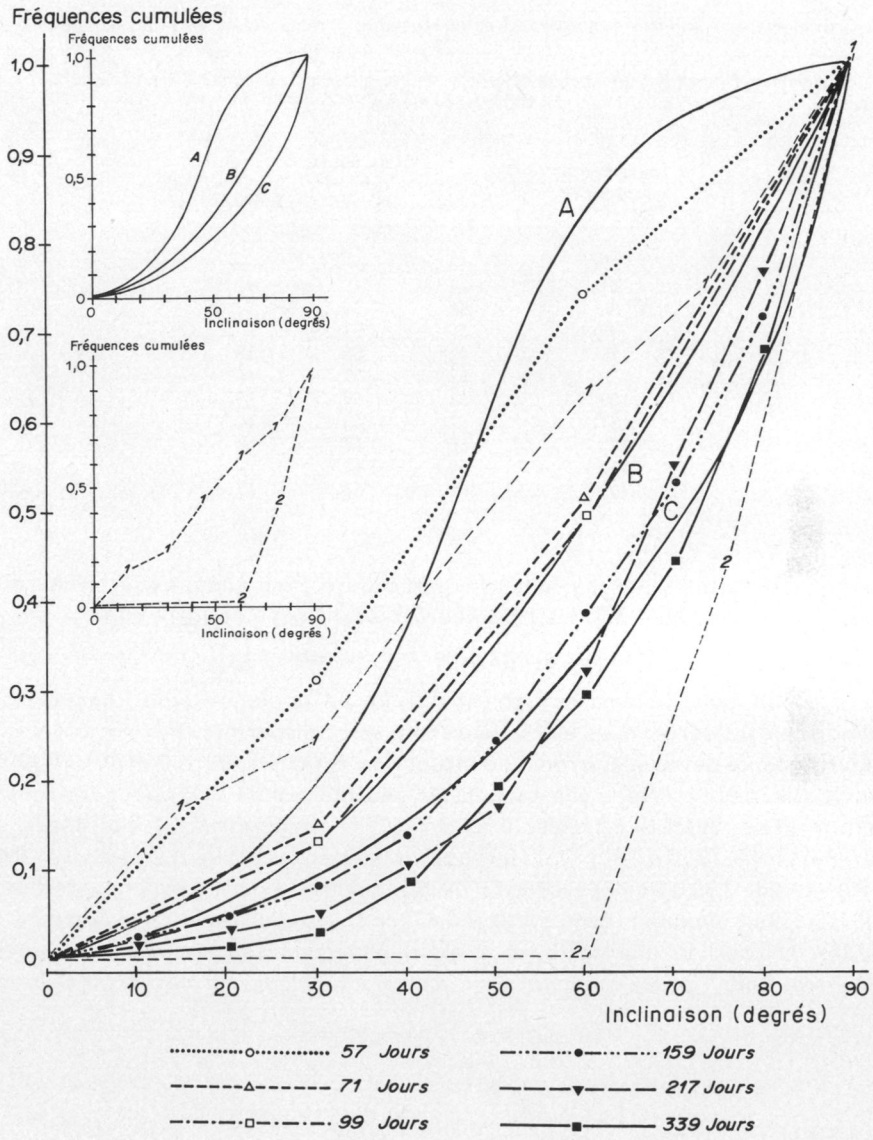


FIG. 4. — *Evolution de la géométrie de la culture : répartition de la surface foliaire en fréquence cumulée, en fonction de l'inclinaison, variété PR 1059, saison 1975-1976.*

Courbes avec symboles :

Courbes en traits pleins : A géométrie de type plagiophile ; B géométrie de type sphérique ; C géométrie de type érectophile.

Courbes en tirets : 1 géométrie d'une culture de Q 78, $F_f = 5,2$; 2 géométrie d'une culture B 6898, $F_f = 3,7$.

Cumulative frequency distribution of leaf inclination : evolution during growing season for PR 1059 variety (curves with symbols) *in days after plantation, geometry for three theoretical crops* (full line curves), *dotted line curves give geometry for Q 78* (curve 1) *and B 6889* (curve 2).

TABLEAU 5

Evolution de l'inclinaison moyenne (i) *de la végétation : comparaison entre les variétés PR* 1059, *HJ* 5741 *et B* 64277 *pour la saison* 1975-1976

Evolution of mean leaf inclination of canopy during growing season, for three varieties : PR 1059, *HJ* 5741, *B* 64277

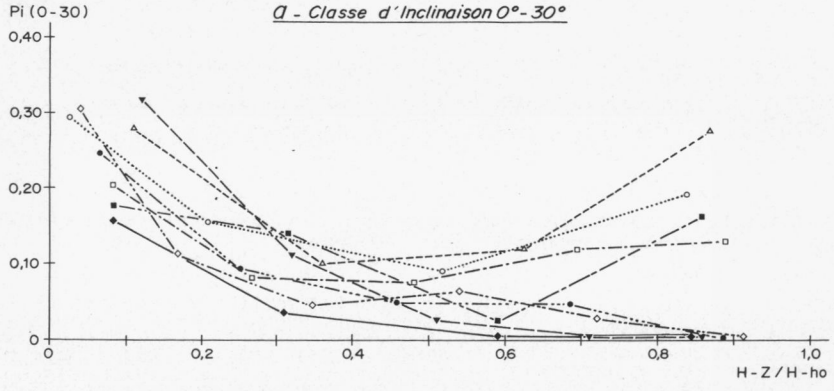
Jours après plantation	$\bar{i}$ en degré		
	PR 1059	HJ 5741	B 64277
57	42	—	—
61	—	48	43
84	56	55	52
99	55	52	53
118	62	58	58
138	63	57	60
159	63	59	59
187	62	63	62
272	65	67	65
312	64	—	—
339	66	66	67

fils de $P_{(i)}$ pour caractériser la géométrie de la culture. Pour chaque couche représentée par un $(H - z)/(H - h_0)$, les trois courbes sont liées par la relation :

$$P_i(0\text{-}30) + P_i(30\text{-}60) + P_i(60\text{-}90) = 1 .$$

Les profils ainsi obtenus présentent une forme analogue dans chaque classe d'inclinaison considérée, mais leur valeurs sont assez dispersées.

La fréquence des feuilles ayant une inclinaison comprise entre 0 et 30°, ($P_i(0\text{-}30)$) est faible (inférieur à 0,30) ; elle varie assez peu (autour de 0,05) pour les couches moyennes ($(H - z)/(H - h_0)$ entre 0,30 et 0,60) et supérieures où elle garde une valeur plus élevée (0,20 à 0,30). Dans les couches inférieures ($(H - z)/(H - h_0) > 0,60$), $P_i(0\text{-}30)$ varie de 0,30 à 0 du début à la fin de la végétation. Pour les inclinaisons moyennes, $P_i(30\text{-}60)$ est maximum (entre 0,40 et 0,60) pour les couches les plus basses, diminue dans les couches intermédiaires et est relativement constant dans les couches supérieures. Enfin, pour la classe d'inclinaison 60-90°, les profils présentent une



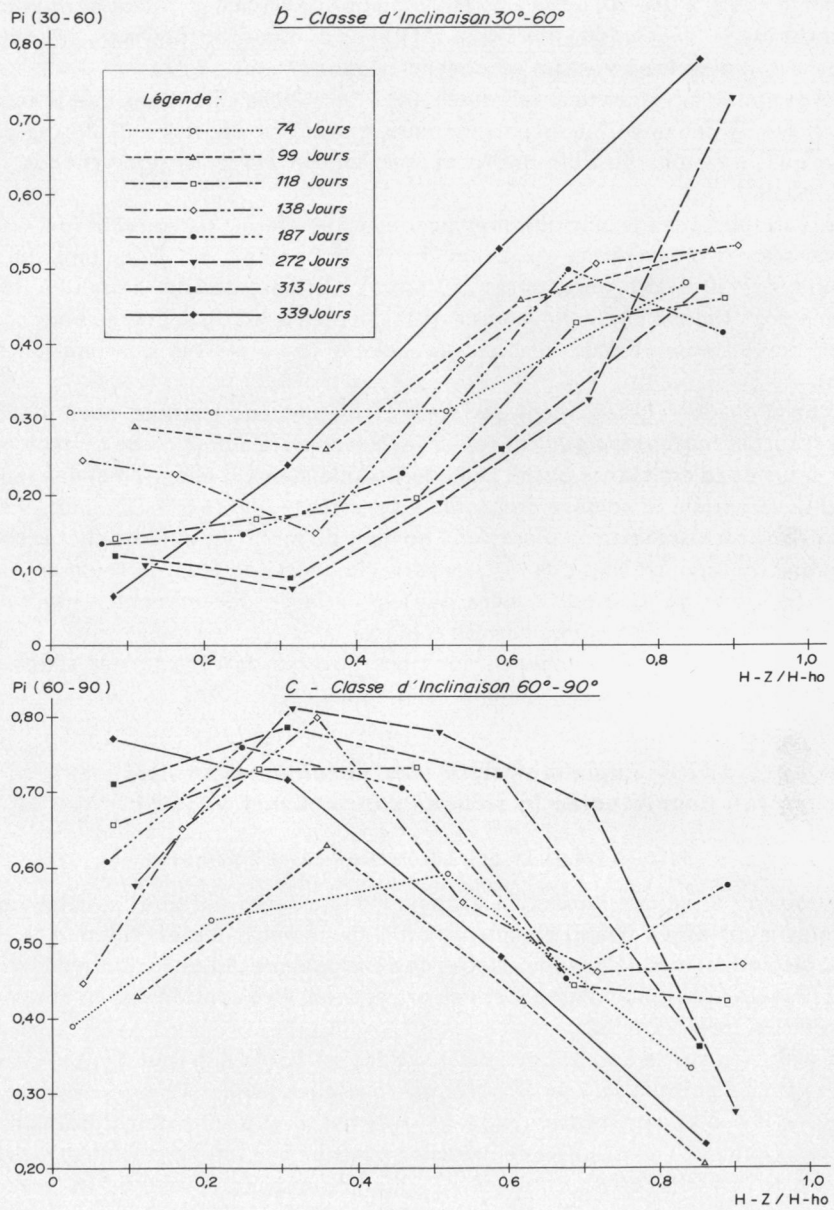


FIG. 5. — *Evolution de la géométrie de la culture : répartition de la surface foliaire en fréquence* ($P_{(i)}$) selon trois classes d'inclinaison : 0-30 (5a), 30-60 (5b), 60-90 (5c), *en fonction de la position moyenne relative de chaque couche* : $(H - z)/(H - h_0)$, *et à différents stades de développement pour la variété PR* 1059 (saison 1975-1976).

Profiles of leaf area distribution (in frequency) *between three leaf inclination classes* : 0-30 (5a), 30-60 (5b), 60-90 (5c) *in relation of normalized mean height of layer* $(H - z)/(H - h_0)$). Evolution during growing season for PR 1059 variety, in days after plantation.

valeur maximale (P_i(60-90) entre 0,60 et 0,80) pour des couches situées dans la moitié supérieure de la végétation, alors que P_i(60-90) diminue un peu vers les couches supérieures et beaucoup vers les couches inférieures.

La comparaison statistique (effectuée dans les mêmes conditions que précédemment cf. § 3.1) des ajustements polynomiaux (polynôme de degré 3) de ces profils montre qu'il n'est pas possible de tracer une courbe moyenne pour chaque classe d'inclinaison.

La variabilité des profils observés peut être réduite en regroupant (de visu) les mesures selon trois périodes au cours du développement de la culture (jusqu'à 120 jours, de 120 à 250 jours, après 250 jours). On peut obtenir alors une courbe moyenne pour chaque phase, l'évolution de la géométrie est donc décrite pour chaque variété, par un ensemble de neuf profils moyens (trois classes d'inclinaison, trois phases).

Cependant, le regroupement des variétés n'étant pas possible pour toutes les phases (courbes moyennes significativement différentes), la définition de ces trois périodes au cours de la croissance paraît peu intéressante même si elle permet de diminuer pour chaque variété le nombre de profils à considérer (de 24 à 9). De plus, il serait nécessaire de s'assurer par un plus grand nombre de mesures, que ces phases correspondent bien à une évolution de la géométrie, la première étant la seule qui puisse être reliée à une période particulière dans le cycle de développement du couvert végétal (très forte croissance en surface foliaire).

Avec nos résultats, il n'apparaît donc pas possible de caractériser simplement l'évolution de la géométrie des cultures étudiées.

IV. — Représentativité des paramètres utilisés pour étudier la structure du couvert végétal

4.1. — *Précision des paramètres caractéristiques*

Le tableau 6 indique l'ordre de grandeur des erreurs absolues et relatives des différentes mesures, en tenant compte à la fois des erreurs d'échantillonnage et des erreurs aléatoires, calculées à deux stades de développement d'une culture de PR 1059 (50 et 270 jours après plantation). Ces valeurs peuvent être considérées comme extrêmes pour les trois variétés.

La précision sur le nombre de feuilles vertes est particulièrement faible dans les premiers stades puisque la tige ne porte que quelques feuilles (2 à 5) ; en fait, cela correspond à une erreur théorique ($|\Delta n_f| = 1$) qui n'est pratiquement pas commise lors des comptages. La variation de précision obtenue sur les indices foliaires (F_f, F_t, F_s) résulte de la méthode de mesure (cf. § 2.1) qui découpe la végétation en morceaux d'organe de nombre et de taille différents (150 à 800 pour le limbe). L'utilisation des dimensions de la feuille entière et d'une corrélation avec sa surface (cf. § 2.2.1 et tabl. 2.3) ne conduit pas à une erreur relative ($|\Delta F_f|/F_f$) supérieure à 15 p. 100. La précision de l'indice foliaire total F obtenu par les photographies hémisphériques a été estimée par ailleurs (Bonhomme, 1974) et dépend notamment du nombre de clichés ; la valeur qui est indiquée ici, représente un maximum. La précision sur la géométrie de la culture représentée par une inclinaison moyenne ou par la répartition de la surface foliaire selon des classes d'inclinaison n'a pu être estimée.

TABLEAU 6

Précision des paramètres caraciérisiiques de la structure du couvert végétal
Accuracy for some phytometric characteristics of plant stand

	Erreur absolue sur les mesures	Erreur relative sur les paramètres (en p. 100)
• Comptages		
— Nombre de tiges sur 3 m de rang : n_t	$\lvert \Delta n_t \rvert = 1$	$\left\lvert \frac{\Delta N_t}{N_t} \right\rvert$ de 1 à 5
— Nombre de feuilles vertes par tige : n_f	$\lvert \Delta n_f \rvert = 1$	$\left\lvert \frac{\Delta N_f}{N_f} \right\rvert$ de 10 à 25
• Mensurations		
— Hauteur de la culture H en cm	$\lvert \Delta H \rvert = 1$ si $H < 200$ $\lvert \Delta H \rvert = 2{,}5$ si $H > 200$	$\left\lvert \frac{\Delta H}{H} \right\rvert$ de 0,5 à 2
— Hauteur des tiges H_t en cm .	$\lvert \Delta H_t \rvert = 1$	$\left\lvert \frac{\Delta H_t}{H_t} \right\rvert$ de 0,5 à 10
— Longueur, largeur, diamètre en mm (morceaux de feuille ou de tige)	$\lvert \Delta \rvert = 1$	$\left\lvert \frac{\Delta F_f}{F_f} \right\rvert$ de 2 à 10
		$\left\lvert \frac{\Delta F_t}{F_f} \right\rvert$ de 2 à 10
		$\left\lvert \frac{\Delta F}{F} \right\rvert$ mesurée 2 à 10
		$\left\lvert \frac{\Delta F}{F} \right\rvert$ 20 photographies hémisphériques (Bonhomme, 1974)
		$\left\lvert \frac{\Delta F_s}{F_s} \right\rvert$ estimé de 30 à 40
— Inclinaison i en degrés (morceaux de feuille ou de tige) .	$\lvert \Delta i \rvert = 2$	répartition en classe, erreur non évaluée

4.2. — *Dispersion des valeurs des paramètres caractéristiques*

Pour étudier la structure du couvert végétal, nous avons admis (cf. § 2.1) que la végétation était horizontalement uniforme (pas « d'effet de rang ») et nous avons représenté les paramètres caractéristiques par leur valeur moyenne. Nous avons ainsi supposé que les hétérogénéités relatives à ces paramètres étaient distribuées de façon aléatoire. Pour connaître la dispersion de ces hétérogénéités, nous avons testé la distribution des valeurs observées par rapport à une loi de répartition aléatoire et normale, la normalité étant nécessaire pour comparer statistiquement l'effet de divers traitements (stade de développement, variété, site...) sur les paramètres, à l'aide des tests classiques (Dagnélie, 1969).

Nous avons indiqué sur le tableau 7 pour deux stades de développement (variété PR 1059 âgée de 50 et 270 jours), les caractéristiques :

TABLEAU 7

Distribution des valeurs observées pour quelques paramètres caractéristiques de la structure du couvert végétal (variété PR 1059) : *tests de normalité*

Distribution of observed values for some characteristics of PR 1059 *stand at two stages of development* (50 and 270 days, after plantation)

	Culture âgée de 50 jours					Culture âgée de 270 jours				
	H	H_t	N_t	N_f	s_{35}	H	H_t	N_t	N_f	s_{35}
Valeur moyenne (cm)	83	40	47	5,15	0,180	368	239	48	8,4	0,0145
Ecart-type de la moyenne	1,5	2,5	1,5	0,06	0,011	2,5	4	0,3	0,6	0,001
Degré symétrie (coefficient b_1, Pearson) ...	— 0,03	0,02	— 0,91 *	0,08	0,18	— 0,55 *	— 0,32	— 0,31	1,20 *	0,63
Degré d'aplatissement (coefficient b_2, Pearson)	2,45	2,44	2,75	2,32	3,51	2,95	2,33	2,34	3,48	3,44
Nombre de données .	100	49	20	80	20	52	31	20	50	20

* Distribution significativement différente de la loi normale au seuil de 5 p. 100.

— moyenne,

— écart-type de la moyenne,

— coefficient de Pearson sur le degré de symétrie,

— coefficient de Pearson sur le degré d'applatissement,

— nombre de données,

de la répartition des valeurs obtenues pour la hauteur de la culture (H), la longueur de la tige (H_t), le nombre des tiges sur une longueur de 3 m de rangs (n_t), le nombre de feuilles vertes par tige (n_f) et la fraction de ciel (s_{35}) vue au travers de la végétation.

Selon les paramètres, les distributions des valeurs observées s'écartent parfois d'une loi normale, soit en début soit en fin de culture. En fait, l'évolution de ces caractéristiques (non représentée) montre que ces distorsions ne sont pas systématiques.

L'hypothèse d'une répartition aléatoire normale des hétérogénéités n'est donc pas toujours vérifiée ; cependant, sur l'ensemble des paramètres et pour la plupart des observations, nous pouvons admettre sa validité.

La dispersion des valeurs mesurées pour les indices foliaires (F_f, F_t) n'a pas été étudiée, le nombre de répétitions (trois à cinq fois une surface de 1,5 m², cf. § 2.1) étant beaucoup trop faible.

4.3. — *Non uniformité horizontale du couvert végétal*

Le couvert végétal formé par une espèce cultivée n'est jamais horizontalement uniforme, le type de semis ou de plantation introduit une disposition particulière des plantes à laquelle correspond une hétérogénéité systématique. De plus, au niveau de chaque plante elle-même, la répartition des organes dans l'espace n'est pas homogène.

Cette schématisation aux conséquences importantes, en particulier, dans les premiers stades de développement de la culture, a été néanmoins adoptée par de

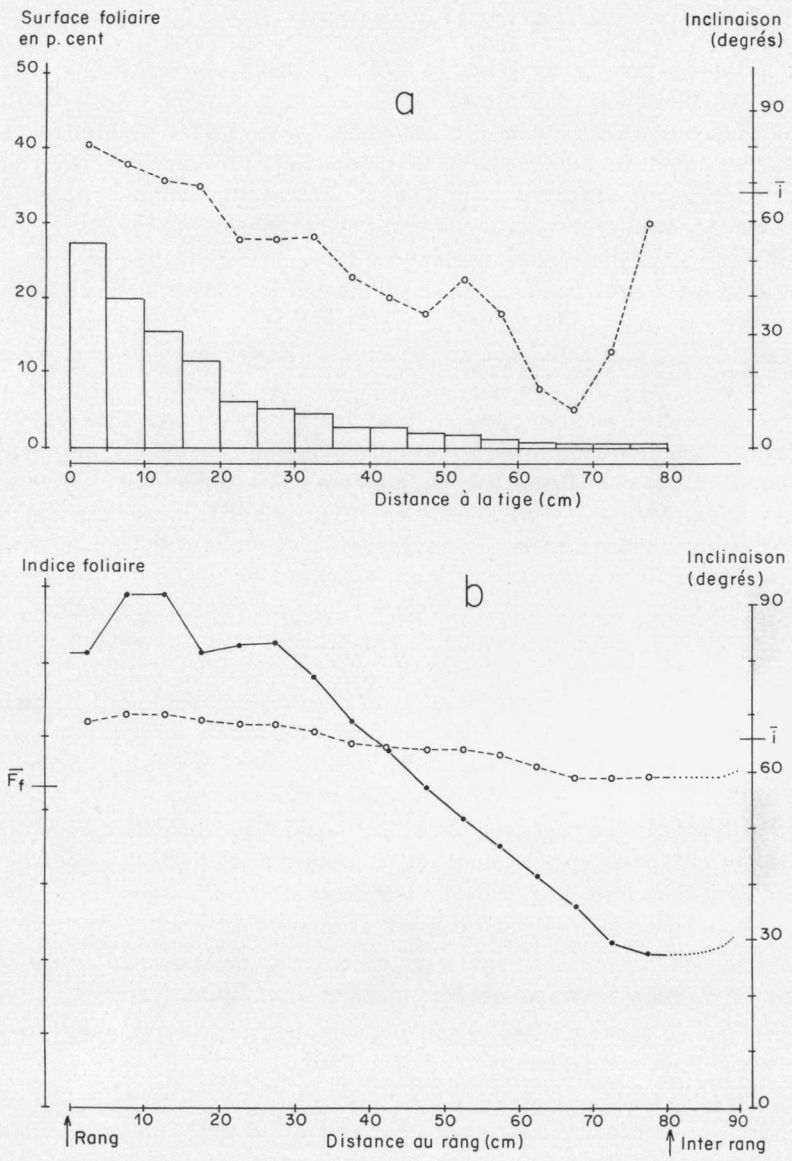


FIG. 6. — a) *Répartition de la surface foliaire et variations de l'inclinaison moyenne, dans le plan d'insertion des feuilles pour un pied de PR* 1059 *prélevé dans une culture de* 140 *jours.* Pour la couche horizontale 150-200 cm, surface foliaire en p. 100 de la surface de feuille de la couche (rectangles) et inclinaison moyenne (cercle), en fonction de la distance à la tige (par tranche de 5 cm) qui sert d'axe d'origine et qui est supposé axe de symétrie pour la plante : le trait horizontal sur l'axe des inclinaisons indique l'inclinaison moyenne de la couche. b) Variations de l'indice foliaire et de l'inclinaison moyenne *calculés* pour une culture de PR 1059 de 140 jours, en fonction de la distance au rang (tranche verticale de 5 cm). Les traits horizontaux sur les axes des inclinaisons et des indices foliaires donnent les valeurs moyennes : $\bar{F}_f = 4{,}3$, $\bar{i} = 66^o$.

a) *Leaf area distribution and mean inclination variation for a PR* 1059 *plant* (140 days after plantation) *in the leaves insertion plane.* Examples of results for 150-200 cm horizontal layer ; leaf area (in p. 100 of leaf area layer, rectangle) and leaf inclination (circles) in relation to distance from stalk (by vertical layers of 5 cm) which is central axis and supposed symetrical axis for the whole plant. Mean leaf inclination of the layer is given by line on inclination axis. b) Variation of calculated inclination (i) and leaf area index (F_f) for a PR 1059 crop, 140 days after plantation in relation of distance from the row (mean values of $\bar{F}_F$ (4,3) and $\bar{i}$ (66°) are given by lines on ordonates axis).

nombreux auteurs pour caractériser la structure de la végétation (Nichiporovich, 1961 ; De Wit, 1965 ; Ross et Vlasova, 1967 ; Loomis *et al.*, 1968 ; Ross, 1969 ; Chartier, 1969 ; Lemeur, 1973 ; Monsi *et al.*, 1974...). On considère généralement que la culture atteint rapidement un stade de développement suffisamment important pour recouvrir le sol et que l'effet des rangs devient alors négligeable par rapport au problème étudié (pénétration des rayonnements solaires, photosynthèse...).

L'hétérogénéité de la répartition spatiale des feuilles d'une tige de canne à sucre peut être étudiée à partir du cliché de sa silhouette (Ito, 1969 ; Daynard, 1971) et les lois de variation de largeur des limbes (cf. § 2.21 et tabl. 2.2). Il est possible d'estimer la surface foliaire et son inclinaison par couches verticales (la tige sert d'axe origine) et horizontales.

Ces calculs ont été effectués, pour un pied de PR 1059 (culture âgée de 140 jours), en considérant que les feuilles sont toutes dans le même plan vertical, et symétriques par rapport à la tige pour l'ensemble de la plante (elles sont en fait alternes et opposées), par couche horizontale de 50 cm d'épaisseur et par tranche verticale de 5 cm. La figure 6*a* donne à titre d'exemple, les résultats obtenus pour la couche 150-200 cm, la surface foliaire de chaque tranche étant exprimée en p. 100 de la surface totale dans la couche. L'inclinaison foliaire est très variable par rapport à sa valeur moyenne (trait horizontal sur l'axe des inclinaisons) ; cependant, son évolution correspond assez bien à la « forme moyenne » d'une feuille dans l'espace : limbe dressé vers le point d'insertion, puis portion plus plane et extrémité retombante proche de la verticale. La surface foliaire apparaît très concentrée autour de la tige. Pour les autres couches, les variations de l'inclinaison sont voisines alors que la surface foliaire est répartie de façon plus homogène dans les couches inférieures.

La plante entière (on regroupe toutes les couches) présente 80 à 90 p. 100 de sa surface foliaire (selon la variété) dans les 40 premiers centimètres autour de sa tige alors que, pour cette zone, l'inclinaison varie de 20 à 80°.

Au niveau de la culture, il faut considérer que :

— le plan d'insertion des feuilles sur chaque tige ne reste pas perpendiculaire à la direction du rang mais peut prendre d'autres orientations (azimut),

— les tiges de canne à sucre ne sont pas alignées sur le rang, mais forment une « souche » s'étalant sur l'interrang,

— les tiges ne sont pas rigoureusement verticales, et un écart de quelques degrés par rapport à la verticale, entraîne pour des plantes de cette taille, une modification très importante de la dispersion horizontale de la surface foliaire.

Nous avons supposé que :

— le plan des feuilles ne présente pas d'azimut privilégié (cf. § 2.1),

— l'effet de la souche correspond à une disposition des tiges telle que la moitié est située sur le rang et l'autre moitié à 20 cm de celui-ci,

— les inclinaisons moyennes des tiges se répartissent également entre trois classes : 60-70, 70-80 et 80-90°,

et nous avons calculé, à partir du cliché utilisé précédemment, la répartition horizontale de la surface foliaire et la variation de l'inclinaison pour une culture fictive de PR 1059 âgée de 140 jours ($F_t = 4{,}3$; $\overline{i} = 66°$). Les résultats présentés sur la figure 6*b* doivent être considérés avec prudence ; toutefois, ils indiquent les ordres de grandeur

des variations horizontales de l'indice foliaire (F_f, courbe 1) et de l'inclinaison des feuilles ($\bar{i}$, courbe 2) autour de leur valeur moyenne. L'hétérogénéité horizontale de l'inclinaison semble atténuée ($\bar{i}$ varie entre 58 et 70°), alors que celle de l'indice foliaire reste marquée (F_f varie de 2 à 7) du fait de l'interrang relativement grand correspondant à la pratique agronomique (mécanisation de la récolte).

V. — Conclusion

Nous nous sommes attachés à décrire en détail la structure du couvert de canne à sucre mais, les techniques utilisées, les méthodes d'estimation, les domaines de précision, doivent être analogues pour de nombreuses cultures de type graminéen.

Le point de départ de ce travail était la nécessité d'une estimation, par couche, de l'indice foliaire et de la géométrie pour aborder la modélisation du microclimat dans une culture ou celle de la photosynthèse du couvert. Il apparaît que :

— l'évaluation des profils de surfaces foliaires peut se faire de façon relativement fiable par la mesure de la hauteur de la culture (H), et du déplacement vertical de la voûte végétale (h_0), connaissant l'indice foliaire F_f (§ 3.1),

— l'estimation de fréquences d'inclinaison de feuilles par couche n'est pas possible de façon simple, les différentes lois utilisées n'étant pas stables au cours du cycle végétatif (effet de la culture ou insuffisance du nombre des points expérimentaux ?).

La discussion de la précision des mesures et estimations montre la très forte hétérogénéité horizontale d'une culture en rang, et pose le problème de l'utilisation, sur de telles végétations, de modèles supposant des couverts homogènes. La difficulté d'obtenir les données nécessaires (géométrie en particulier) à de telles approches, alors que les hypothèses de départ ne sont pas vérifiées, laisse à penser qu'il est nécessaire de mettre au point des modélisations différentes utilisables sur des cultures en rang.

Reçu pour publication en juillet 1980.

ANNEXE

Principales caractéristiques climatiques pour les cultures étudiées les plus importantes

Mean meteorological characteristics during growing season of studied crops

Site et année	Durée du cycle (jours)	Température air moyenne sur le cycle (°C)	Rayonnement solaire global : sur le cycle (MJ m^{-2})	Rayonnement solaire global : moyenne journalière (MJ m^{-2})	Précipitations sur le cycle (mm)	Précipitations moyenne journalière (mm)	Evapotranspiration Penmann sur le cycle (mm)	Evapotranspiration Penmann moyenne journalière (mm)
Zone humide : Duclos								
1973-1974	328	24,7	6 029	18,4	2 174	6,6	1 489	4,5
1974-1975	260	24,2	5 009	19,3	1 812	7,0	1 090	4,2
1975-1976	340	24,0	6 365	18,7	2 606	7,7	1 295	3,8

Summary

Study of the canopy structure of sugar cane crop

Canopy structure of sugar cane crop has been studied in relation to growing stage. The canopy is supposed to be homogeneous in a horizontal plane. The main phytometric characteristics of the plant stand (height, leaf area index, leaf inclination...) have been measured (fig. 1 and 6, tables 1 and 5). Some relations which estimate leaf area or describe the blade width variations are also given (table 2).

Vertical distribution of leaf area orientation have been obtained at different stages of growing (fig. 2 and 5, tables 3 and 4). These profiles have been fitted with beta function or with orthogonal polynomial function of degree 3. For leaf area, only one relation can be considered during all the growing period (fig. 3) ; so it is possible to estimated vertical distribution of leaf area with height stand (H), height of green vegetation (h_0), and leaf area index (F_t). The vertical distribution of inclination frequencies cannot be estimated by the same manner because fitted curves are significantly different between stages of development.

The accurary of some measurements and estimations is given (table 6) and distribution of their values are tested (table 7).

The « row effect » on horizontal distribution of leaf area index and mean leaf inclination has been estimated (fig. 6) by mean of plant silhouette.

Zusammenfassung

Bestimmung und entwicklung der struktur einer pflanzendecke von zuckerrohr

Die Struktur einer Zuckerrorhkultur wurde charakterisiert, indem die Pflanzendecke als horizontal einheitlich angenommen war. Die « herkömmlichen » Parameter (Kulturhöhe, Blattindex, Neigung...) die es ermöglichen, die Bedeutung und die Geometrie der Vegetation quantitativ zu schätzen, wurden den ganzen Wachstumszyklus der Kultur lang gemessen (Abb 1 und 6, Tafel 1 und 5). Gesetze für die Schätzung der Fläche und die Beschreibung der Form des Blattrands wurden festgestellt (Tafel 2).

Die vertikale Verteilung der Blattfläche und der Geometrie wurde zu verschiedenen Entwicklungsstufen erzielt (Abb 2 und 5, Tafel 3 und 4). Die Anpassungen dieser Profile mit rechtwinkligen Polynome dritten Grades oder Betafunktionen haben erwiesen dass die Verteilung der Blattfläche zwischen den Schichten in ausreichender Weise auf der Grundlage von der Kulturhöhe (H) der Pflanzendeckeverschiebung (h_0), dem Blattindex der Kultur (F_t) und einer einzigen Beziehung (Abb 3) für alle die Entwicklungsstufen zuverlässig geschätzt sein könnte. Für die Profile der Blattneigungsfrequenzen sind die gebrauchten Gesetze während der Kulturentwicklung nicht beständig. Es scheint deswegen nicht möglich, die vertikale Laubverteilung (Geometrie) leicht zu schätzen.

Die Genauigkeit gewisser Messungen und Schätzungen wurde gegeben (Tafel 6) und die Zerstreuung ihrer Werten getestet (Tafel 7).

Auf der Grundlage von einem sehr vereinfachten Muster (Pflanzensilhouette) wurde die horizontale durch die Reihenanordnung eingeführte Heterogenität für das Blattindex und die Blattneigung geschätzt (Abb 6).

РЕЗЮМЕ

Характеры и развитие структуры культуры сахарного тростника.

ВАРЛЕ-ГРАНШЕ С., БОНОМ Р., ЖАКОБ С., АРТИС П., ШАРТЕ М.

Авторы характеризовали структуру культуры сахарного тростника, допуская что растительный покров горизонтально неизменен. Таким образом « классические параметры » /высота культуры, листовой индекс, наклон.../, позволяющие количественно определить значение и геометрию растительности, измерились в течение всего процесса развития культуры /фиг. 1 и 6, табл. 1 и 5/. Установились законы оценки поверхности и описывания формы средней части листа /табл. 2/.

Вертикальное распределение листовой поверхности и листеьв определилось в разные периоды /фиг. 2 и 5, табл. 3 и 4/. Эти профили приладились с помощью ортогональных полиномов зей степени или функций типа « бэта ». Они показали, что распреление листовой поверхности по слоям можно определить надёжно на основе высоты культуры /H/, перемещения

растительного свода /ho/, листового индекса культуры /Ff/ и одной зависимости /фиг. 3/ для всех периодов. Что касается профилей частоты листового наклона, законы меняются во время развития культуры. Таким образом, нельзя просто оценить вертикальное распределение листьев /геометрия/.

Таблицы 6 и 7 показывают точность определённых измерений и разброс опытных величин.

Очень простая модель /« силуэт » растения/ позволила нам оценить горизонтальную гетерогенность листового индекса и наклона листьев, которую вызывает рядовой сев /фиг. 6/.

Références bibliographiques

BONHOMME R., 1974. *Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ.* Thèse Docteur-Ingénieur. Université d'Aix-Marseille, 30 p. + annexes.

BONHOMME R., VARLET-GRANCHER C., CHARTIER P., 1974. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops. *Photosynthetica* **8** (3), 299-301.

BONHOMME R., VARLET-GRANCHER C., 1978. Estimation of the gramineoux crop geometry by plant profiles including leaf width variations. *Photosynthetica* **12** (2), 193-196.

CHARTIER P., 1969. Assimilation nette d'une culture couvrante. I. Détermination de l'assimilation nette d'une culture à partir d'une analyse théorique. *Ann. Physiol. vég.* **11** (2), 123-159.

CHARTIER P., PERRIER A., 1972. Structure du feuillage, agent modificateur du microclimat. *C. R. Acad. Agric.* 8 et 15 nov.

DAGNELIE P., 1969. *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques.* Vol. 1, Presses agronomiques de Gembloux, ed. J. Duculot, 378 p.

DAYNARD T. B., 1971. Characterisation of corn (Zea mays L.) canopies from measurements of individual plants. *Agron. J.* **63,** 133-135.

HEADY H. F., 1957. The measurement and value of plant height in the study of herbaceous vegetation. *Ecology* **38,** 313-320.

ISOBE S., 1969. Theory of the light distribution and photosynthesis in canopies of randomly dispersed foliage area. *Bull. Nat. Inst. agr. Sci.* (Tokyo) **16** (1), 1-25.

ITO A., 1969. Geometrical structure of rice canopy and penetration of direct solar radiation. *Proc. Crop. Sci. Soc.*, Japan **38,** 355-363.

JACQUARD P., 1968. *Etude des relations sociales dans les peuplements végétaux : Cas particulier de quelques graminées et légumineuses pluriannuelles.* Thèse Doc. Etat Fac. Sciences, Montpellier, 173 p.

KVET J., MARSHALL J. K., 1971. Assessment of leaf area and other assimilating plant surfaces. In « *Plant Photosynthetic Production. Manual of methods* » ed. by Z. Sestak, J. Catsky and P. G. Jarvis, D. W. Junk N. V. Publishers. The Hague, 517-555.

LEMAIRE Y., ROBERT G., 1973. *Manuel du planteur.* Ed. par Centre Technique de la Canne à Sucre de Guadeloupe, 200 p.

LEMEUR R., 1973. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data. *Agric. Meteorol.* **12,** 229-247.

LEMEUR R., BLAD B. L., 1974. A critical review of light models for estimating the shortwave radiation regime of plant canopies. *Agric. Meteorol.* **14,** 255-286.

LOOMIS R. S., WILLIAMS W. A., DUNCAN W. G., DOVRAT A., NUMEZ F., 1968. Quantitative description of foliage display and light absorption in field communities of corn plants. *Crop Sci.* **8** (3), 352-356.

MONSI M., UCHIJIMA Z., OIKAWA T., 1974. Structure of foliage canopies and photosynthesis. *Collect. Papers Agric. Meteorol.* **15,** 301-327.

NICHIPOROVICH A. A., 1961. Properties of plant crop as an optical system. *Soviet Plant Physiol.* **8,** 428-435. Transl. from *Fiziologiya Rasteneie* **8** (5), 536-546.

PERRIER A., 1976. *Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux. Profils climatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette.* Thèse Doc. Etat Faculté Sciences, Paris VI.

ROSS J., 1969. Mathematical model of photosynthesis in a plant stand. In « *Prediction and measurement of photosynthetic productivity* ». Proceed. I.B.P. Technical Meeting Trebon. Sept. 14-21, 29-43.

ROSS Y. K., VLASOVA M. P., 1967. Biometric characteristics of a maize stand and the dynamics of its development. In « *Photosynthesis of productive systems* » ed. by Nichiporovich 1966, Transl. ed. by Monteith, Israël Prog for Sci. Translation. Jerusalem, 60-74.

SAEKI T., KUROIWA S., 1959. On the establishment of the vertical distribution of photosynthetic system in a plant community. *Bot. Mag. Tokyo* **72,** 848, 27-35.

SNEDECOR G. W., COCHRAN W. C., 1971. *Méthodes statistiques*. Traduction de H. Boelle et Ecamhaji ed. par A.C.T.A. Paris, p. 649.

VAN DILLEWIJN C., 1954. *Botanique de la Canne à Sucre*. Traduction par C.T.C.S. Guadeloupe et Martinique, 391 p.

VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., CHARTIER P., 1978. Efficiency of sugar canne and cowpea as solar energy converters. *Int. Solar Energy Congress*, New-Dehli 16-21 January., 7 p.

VILA J. P., 1976. *Un outil pour la modélisation biologique et écologique : maximum likelihood Program*. Note nº 13, I.N.R.A. Biométrie, Jouy-en-Josas, 23 p. + annexe.

WATSON D. J., 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. II. The effect of varying nutrient supply on net assimilation rate and leaf area. *Ann. Bot. N. S.* **11**, 375-407.

WATSON D. J., 1952. The physiological basis of variation in yield. *Adv. Agron.* **4**, 101-145.

WIT C. T. de, 1965. *Photosynthesis of leaf canopies*. Agricultural Research Reports (663), Wageningen, 57 p.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 455-471.

Mise au point d'un dispositif expérimental permettant de suivre la consommation hydrique d'une prairie au cours de sa croissance

G. LEMAIRE * et G. ROBERGE **

* *Station d'agronomie d'Angers, I.N.R.A.,*
Antenne expérimentale Station d'Amélioration des Plantes Fourragères
86600 *Lusignan*

** *Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*
Ecole vétérinaire
94700 *Maisons Alfort*

Résumé

L'objectif de ce travail préliminaire était de tester un dispositif de mesure de la consommation d'eau hebdomadaire d'une prairie dans le cadre d'une étude sur les relations entre la croissance en matière sèche, l'absorption d'azote et l'évapotranspiration (ETR) du couvert végétal.

Les mesures d'ETR ont été faites grâce à des bilans hydriques hebdomadaires effectués avec la sonde à neutron.

La précision de ces bilans est analysée. Une méthode permettant de prendre en compte la variabilité des apports d'eau par irrigation est développée ce qui permet d'augmenter notablement la précision des mesures d'ETR : avec huit tubes de mesure par traitement l'erreur reste inférieure à 4 mm (ce qui représente la consommation journalière moyenne).

L'économie de tube de mesure réalisée est cependant contrebalancée par la nécessité de contrôler chaque irrigation par des mesures neutroniques.

I. — Introduction

Ce travail a été réalisé pour mettre au point un dispositif expérimental permettant de suivre en parallèle, sur un peuplement de graminées fourragères, les courbes de croissance en matière sèche, les courbes d'exportation d'azote et les courbes de consommation en eau afin de relier les trois termes suivants :

- vitesse de croissance en MS kg/ha/jour,
- vitesse d'absorption d'azote kg/ha/jour,
- consommation en eau (évapotranspiration réelle), ETR : mm/jour.

Le problème à résoudre était celui de la représentativité des mesures de consommation hydrique (ETR) effectuées à la sonde à neutrons. Pour pouvoir mettre en relation des variations concommittantes de la vitesse de croissance avec l'ETR, il faut travailler à une échelle de temps suffisamment fine, ce qui implique une grande précision

dans la détermination des variables ; or la mesure neutronique est ponctuelle. Peyremorte *et al.* (1972) ont déjà montré la grande variabilité spatiale de ce genre de mesure dans les sols alluviaux de la basse vallée du Verdon et la nécessité de multiplier les sites de mesure.

D'autre part, tout système d'irrigation crée une hétérogénéité supplémentaire qu'il faut prendre en compte. Nous avons donc essayé de tester un dispositif d'irrigation et d'estimer l'hétérogénéité des apports d'eau. Puis nous avons déterminé la précision des bilans hydriques sans irrigation d'une part et avec irrigation d'autre part. Enfin, nous avons essayé de déterminer la meilleure manière de prendre en compte l'hétérogénéité de l'irrigation dans le calcul de l'ETR.

II. — Matériel et méthodes

Nous avons conduit pendant deux étés successifs (1977 et 1978) des essais préliminaires sur des parcelles de Fétuque élevée (var. Ludelle) sur les sols de la Station d'Amélioration des Plantes Fourragères à Lusignan. Le type de sol localement appelé « terres rouges à Châtaigniers » est en fait un sol brun lessivé sur limon, superposé à une argile rouge à pisolithes. La texture en est limoneuse dans les 50 premiers centimètres, et devient argilo-limoneuse à partir de cette profondeur, avec apparition de concrétions ferro-manganiques et de taches d'oxydo-réductions du fer ; ceci révèle un drainage imparfait en période humide *.

1. — *Dispositif expérimental*

1.1. *Disposition des parcelles sur le terrain, mesures de la croissance de l'herbe.*

L'établissement des courbes de croissance de l'herbe nécessite d'effectuer des prélèvements réguliers permettant de mesurer avec suffisamment de précision la production de matière sèche sur pied. Les courbes de croissance sont en général des sigmoïdes et, pour la période estivale qui nous intéresse, le plateau de croissance est obtenu au bout de 6 à 8 semaines. La périodicité des prélèvements doit en outre permettre de mettre en évidence de manière suffisamment précise de brusques changements dans les vitesses de croissance : *une semaine* nous paraît être le pas de mesure maximum. Il faut donc prévoir au moins sept à huit parcelles de prélèvements successifs pour étudier un cycle estival de croissance.

La taille des parcelles élémentaires de prélèvement (2,5 $\times$ 5 m) est la même que celle adoptée pour l'ensemble des essais de la Station d'Amélioration des Plantes Fourragères de Lusignan pour des raisons d'uniformité de matériel (voir fig. 1).

Un ensemble de parcelles élémentaires forme une parcelle principale correspondant à un traitement particulier (dose d'azote par exemple).

Les parcelles principales sont disposées selon la méthode des blocs de Fischer (quatre blocs).

En 1977, nous avons testé deux niveaux de fertilisation azotée extrêmes : 0 N et 150 N, le dispositif n'ayant pas été irrigué.

---

* R. Morlat, communication personnelle.

En 1978, nous avons testé les traitements 0 N et 60 N, l'ensemble du dispositif ayant été irrigué.

1.2. *Dispositif d'irrigation.*

La taille d'un tel essai et la nécessité de pouvoir circuler librement avec les engins de récolte ne permettent pas d'utiliser un système d'irrigation fixe à couverture totale.

D'autre part, le nombre de parcelles relativement élevé nous interdit d'utiliser des systèmes d'apport d'eau très précis du type des « cadres d'irrigation » utilisés par Peyremorte (1972).

Nous avons donc choisi * un système d'aspersion classique dont la maille a été adaptée à la dimension de nos parcelles (cf. fig. 1) :

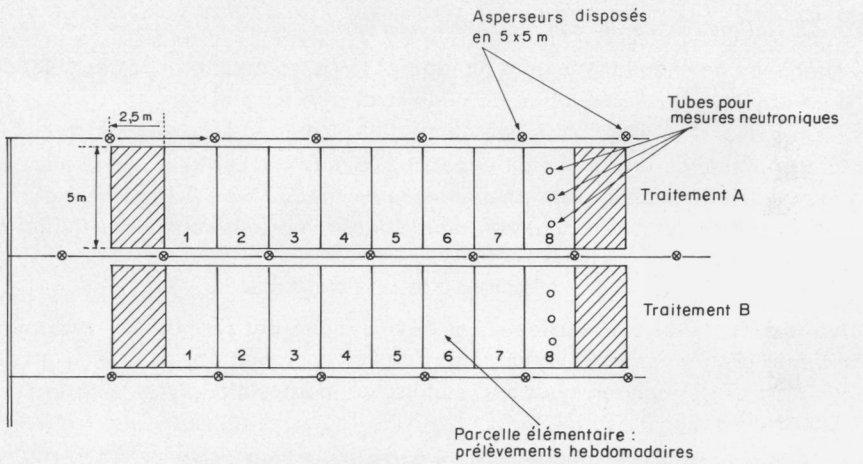


FIG. 1. — *Dispositif expérimental ; schéma d'un bloc.*
Experimental design ; plan of one block.

— asperseur VLA TNT 5° portée 6 m à 2,5 kg/cm² (buses de 1,58 mm),

— disposition 5 × 5 m.

La précision des apports d'eau a pu être mesurée en disposant des minipluviomètres de 50 cm² de section dans la végétation de façon à ce qu'ils affleurent juste au-dessus du couvert végétal.

1.3. *Le dispositif de mesure de la consommation hydrique.*

1.31. *Mesure de la variation du stock d'eau du sol* (ΔW).

La sonde à neutron permet de mesurer en un point donné la variation de stock d'eau du sol. L'utilisation de cet appareil a été décrite par de nombreux auteurs notamment en France (Maertens *et al.*, 1965 ; Marcesse, 1969). Il faut rappeler que la

* Ce système nous a été conseillé par M. Decroix du CTGREF d'Aix-en-Provence.

mesure d'humidité concerne un volume de sol relativement restreint autour du tube d'accès de la sonde.

Nous avons disposé trois tubes par grande parcelle. Ces tubes sont situés dans la sous-parcelle correspondant au dernier prélèvement.

Ce défaut de randomisation est rendu obligatoire par le fait que la coupe de l'herbe a un effet de réduction important sur la consommation d'eau de la prairie et que, si les tubes étaient placés au hasard, un certain nombre d'entre eux seraient donc rendus inutilisables chaque semaine (cf. fig. 1, parcelle 8).

La sonde utilisée était une SOLO de 10 mci. Les comptages étaient effectués en temps long. Les tubes d'accès étaient en PVC.

Les mesures d'humidité étaient réalisées chaque semaine le même jour que les contrôles de croissance, du début juillet à début septembre. L'ensemble des tubes permettait des mesures tous les 10 cm jusqu'à — 180 cm.

1.32. *Estimation de la consommation hydrique.*

Au niveau de chaque tube on a pu estimer la consommation hydrique hebdomadaire en appliquant une équation de bilan hydrique simplifié :

$$ETR = P + I \pm \Delta W \quad \text{(hypothèse d'un drainage D négligeable).}$$

La variabilité du terme D était impossible à préciser car cela aurait nécessité la détermination d'un profil de tension au niveau de chaque tube. L'hypothèse d'un drainage négligeable nous a paru plausible étant donné la période considérée (juillet-août).

2. — *Méthode d'analyse statistique*

Nous avons analysé statistiquement la variabilité des termes ΔW (variation de stock d'eau) et I (apports par irrigation).

Pour ces deux analyses, nous avons utilisé un modèle d'analyse de variance nous permettant d'estimer :

— d'une part la variabilité des mesures entre parcelles,

— d'autre part, la variabilité des mesures à l'intérieur d'une parcelle.

Par exemple, si nous considérons la variable I_{ij}, pluviométrie recueillie dans le pluviomètre j dans la parcelle i, le modèle permet d'écrire :

$$I_{ij} = \mu + A_i + E_{ij}$$

μ = pluviométrie moyenne de l'ensemble des parcelles,

A_i = écart de la pluviométrie moyenne de la parcelle I par rapport à μ,

E_{ij} = écart de la pluviométrie recueillie dans le pluviomètre j par rapport à la pluviométrie moyenne de la parcelle i, estimée par A_i.

Nous considérons que la pluviométrie reçue par une parcelle donnée résulte d'un tirage au sort des asperseurs qui l'encadrent, les pertes de charge étant relativement faibles dans notre dispositif, étant donnés ses dimensions et son débit d'utilisation. Le terme A_i est alors une variable aléatoire de moyenne nulle et de variance σ_A^2. De même on considère que E_{ij} est une variable aléatoire de moyenne nulle et de variance σ_E^2.

— σ_A^2 mesure la variabilité des apports d'eau entre parcelles,

— σ_E^2 mesure la variabilité des apports d'eau à l'intérieur des parcelles.

Ce modèle d'analyse de variance à facteur aléatoire permet d'estimer σ_A^2 et σ_E^2 en

calculant la somme des carrés des écarts correspondante ; sachant que les espérances mathématiques de ces SCE sont données par les formules :

effet parcelle :

$$E(SCE_P) = (p - 1)\,\sigma_E^2 + n(p - 1)\,\sigma_A^2$$

effet résiduel :

$$E(SCE_E) = p(n - 1)\,\sigma_E^2$$

p = nombre de parcelles,
n = nombre de pluviomètres par parcelle.

Ces formules permettent une estimation $\hat{\sigma}_E^2$ et $\hat{\sigma}_A^2$ des paramètres σ_E^2 et σ_A^2. On peut déterminer un intervalle de confiance autour de ces estimations ayant une probabilité donnée de contenir la vraie valeur de la variance. On se contentera en fait d'un test unilatéral nous permettant de déterminer la limite maximum de l'intervalle de confiance. On choisira un risque $\alpha = 0{,}05$.

Le test unilatéral pour σ_E^2 (d'après Dagnelie)

$$\sigma_E^2 < \frac{SCE_E}{\chi^2\,\alpha}.$$

Le test unilatéral pour σ_A^2 (d'après Schéffé)

$$\sigma_A^2 < \frac{\hat{\sigma}_E^2}{n}\left[F_{\alpha,\,\infty,\,\nu_1} \times F_{cal} - 1 + \frac{1}{F_{\alpha,\,\nu_2,\,\nu_1}}\left(1 - \frac{F,\,\infty,\,\nu_1}{F,\,\nu_2,\,\nu_1}\right)\right]$$

ν_1 = nombre de degrés de liberté de SCE_A,
ν_2 = nombre de degrés de liberté de SCE_E

$$F_{cal} = \frac{SCE_P}{p - 1} \Big/ \frac{SCE_E}{p(n - 1)}.$$

Pour la variable ΔW on utilise le même modèle de base ΔW_{ij} = variation du stock d'eau au niveau du tube j dans la parcelle i :

$$\Delta W_{ij} : \mu + A_i + E_{ij}$$

et on estime de la même manière σ_A^2 et σ_E^2.

III. — Résultats et discussions

1. — *Précision des variations de stock d'eau* ΔW

1.1. *Mesures de* ΔW *en absence d'irrigation.*

Durant l'été 1977, nous avons pu réaliser un dispositif permettant de mesurer la croissance de l'herbe sous deux traitements azotés extrêmes zéro et cent cinquante unités, ainsi que les variations de stock d'eau du sol correspondant. L'essai comprenait quatre blocs, avec trois tubes par parcelle, soit douze tubes pour un niveau d'azote.

Le modèle mathématique et les résultats des analyses de variance effectuées sont reportés sur le tableau 1.

TABLEAU 1

Analyse de variance des variations de stock d'eau du sol en absence d'irrigation (1977)
Variance analysis of soil water variations without irrigation (1977)

Période de mesure	Variance Azote	Variance Bloc	Variance azote × bloc	Variance résiduelle	Moyenne ΔW	$\hat{\sigma}_E$	Valeur limite de σ_E^2 $\alpha = 0,05$	d : Intervalle de confiance ΔW $\alpha = 0,05$ n = 12	n = 8	Pluie
ddl	1	3	3	16						
du 27/06 au 04/07	12,62 n.s.	40,81 n.s.	30,28 n.s.	12,73	— 14,3 mm	3,57	5,15	2,18	2,68	6 mm
du 05/07 au 11/07	18,20 n.s.	55,27 *	23,24 n.s.	7,84	— 23,7 mm	2,80	4,04	1,71	2,10	0,6 mm
du 12/07 au 18/07	144,90 ***	114,12 ***	21,00 n.s.	7,83	— 15,6 mm	2,80	4,04	1,71	2,10	3 mm
du 19/07 au 25/07	358,82 ***	5,28 n.s.	3,35 n.s.	17,99	— 19,0 mm	4,24	6,12	2,59	3,18	9 mm
du 26/07 au 02/08	0,96 n.s.	28,33 n.s.	12,38 n.s.	5,37	— 2,8 mm	2,32	3,34	1,42	1,74	14,7 mm
du 03/08 au 09/08	101,68 ***	118,73 ***	6,03 n.s.	10,34	— 26,5 mm	3,22	4,64	1,97	2,41	0,5 mm

• Modèle Mathématique, Mathematic model $(\Delta W)_{ijk} = \mu + a_i + B_j + (aB)_{ij} + E_{ijk}$
a_i = effet azote (fixe), nitrogen effect ; B_j = effet bloc (aléatoire), block effect.
i = dose d'azote, nitrogen level ; j = numéros du bloc, block number ; k = numéros du tube, tube number.

• σ_E^2 = variance résiduelle ;

• $d = \sqrt{\frac{t_\alpha^2 \times \hat{\sigma}_E^2}{n}}$

avec : t_α = valeur de t au seuil $\alpha = 0,05$ et d_{dl} correspondant à $\hat{\sigma}_E^2$; n = nombre de tubes, number of tubes.

L'effet du niveau de l'azote sur le dessèchement du sol se manifeste dès la troisième semaine de croissance ; durant la semaine du 25/07 au 2/08, l'effet de l'azote disparaît, ce qui correspond à une période pluvieuse à très faible ETP (fig. 2) ; il réappa-

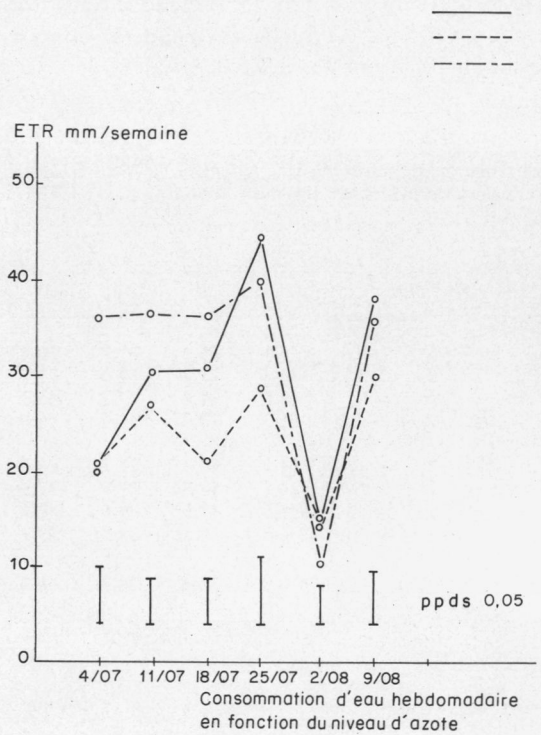


FIG. 2. — *Consommation d'eau hebdomadaire en fonction du niveau d'azote.*
Weekly water consumption in relation to nitrogen supply.

●——● ETR 150 N.
●------● ETR 0 N.
●·-·-·● ETP Penman.

raît la semaine suivante lorsque la demande augmente. L'effet bloc n'est pas stable dans le temps ; ce ne sont pas les mêmes horizons qui participent à l'alimentation hydrique aux différentes dates et l'hétérogénéité entre blocs n'est pas la même sur tout le profil. L'effet bloc a été considéré comme aléatoire (Dagnélie, 1969).

L'absence de signification de l'interaction « azote × bloc » montre que la variabilité intra-bloc est du même ordre de grandeur que la variabilité résiduelle. Ceci nous permet donc d'utiliser la variance résiduelle pour tester l'effet azote (Dagnélie, 1969).

Le tableau 1 présente les intervalles de confiance pour chaque période pour une moyenne de douze ou de huit tubes. Nous voyons qu'en absence d'irrigation, les variations de stock d'eau du sol peuvent être estimés avec un intervalle de confiance :

$$\text{I.C.} < 2{,}6 \text{ mm pour douze tubes,}$$
$$\text{I.C.} < 3{,}2 \text{ mm pour huit tubes,}$$

et que huit tubes peuvent suffire pour estimer ΔW.

1.2. *Mesures de* ΔW *avec irrigation.*

En 1978, nous avons repris le même dispositif et nous avons mesuré la variation du stock d'eau du sol pendant la période du 25/07 au 7/08 durant laquelle l'irrigation a été de 22 mm environ et la pluie de 39,8 mm. Le tableau 2 nous donne les résultats de l'analyse de variance. La variance résiduelle devient assez importante $\hat{\sigma}_E = 7{,}08$ mm avec comme valeur limite 10,72 mm ($\alpha = 0{,}05$).

TABLEAU 2

Variation de stock d'eau du sol (en mm) *avec irrigation* (1978). *Période du* 25/07 *au* 07/08
Soil water variation (in mm) *with irrigation* (1978)

		Blocs				
	Tube	I	II	III	IV	
N = 0	1	35,1	35,5	59,7	50,3	
	2	34,6	27,2	32,5	50,7	
	3	41,0	31,4	27,7	45,3	
	$\bar{x}$ =	36,9	31,4	40,0	48,8	39,3
N = 60	1	34,2	40,4	27,7	39,0	
	2	34,5	38,6	37,8	37,5	
	3	41,6	33,5	34,6	42,6	
	$\bar{x}$ =	36,8	37,5	33,4	39,7	36,8
	$\bar{X}$ =	36,8	34,4	36,7	44,2	38,0

Source de variation	SCE	d_{dl}	Variance	
Totale	1 374,55	23		
Azote.....	35,04	1	35,04	n.s.
Bloc	328,25	3	109,42	n.s.
Azote × Bloc	210,01	3	70,00	n.s.
Résiduelle	801,25	16	50,08	

$\hat{\sigma}_E = 7{,}08$ mm ;
$\sigma_E \leqslant 10{,}72$ mm test unilatéral ($\alpha = 0{,}05$).

L'irrigation augmente donc notablement la variabilité de nos mesures puisque la valeur estimée de σ_E est supérieure aux valeurs limites calculées dans le tableau 1.

L'intervalle de confiance des moyennes estimées :

I.C. = 4,33 mm pour douze tubes,
I.C. = 5,31 mm pour huit tubes.

Ces valeurs ne sont plus négligeables dans le cas où l'on désire faire des bilans hebdomadaires. On est donc pratiquement obligé de travailler avec douze tubes si on veut rester à un seuil de précision équivalent à la valeur de la consommation hydrique journalière moyenne (entre 4 et 5 mm/jour).

2. — *Précision des apports d'eau*

La variabilité des apports d'eau a été mesurée au moyen de cinquante mini-pluviomètres disposés de diverses manières sur un groupe de parcelles. Ces dispositions nous ont permis de faire ressortir dans l'analyse statistique la variabilité inter-parcelle et la variabilité intra-parcelle.

2.1. *Disposition n° 1* (tabl. 3).

(Neuf pluviomètres par parcelle sur cinq parcelles consécutives).

Les pluviomètres sont disposés en trois rangées ce qui permet de tester l'hypothèse d'un gradient de pluviométrie en fonction de la proximité des lignes d'asperseur.

TABLEAU 3

Mesure des apports d'eau (en mm) *par minipluviomètre*
Measurement of water supply (in mm) *by mini pluviometers*
(disposition n° 1)

	1			2			3			4			5			$\bar{x}$
r_1	45,7	48,0	52,8	50,7	47,7	44,7	46,5	51,9	52,5	49,5	48,0	45,6	48,6	52,2	50,4	48,99
r_2	51,3	48,3	46,8	48,0	46,2	46,8	46,8	48,9	51,3	55,5	57,9	60,3	59,7	57,0	51,9	51,78
r_3	56,7	49,8	49,2	52,5	55,8	42,0	59,7	57,9	57,3	55,2	59,1	50,4	68,4	55,5	53,7	54,88
$\bar{x}$		49,8			48,2			52,5			53,5			55,3		$\bar{X} = 51,8$ mm

Modèle d'analyse de variance (Croisé mixte)

$$l_{ijk} = \mu + A_i + r_j + C_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

A_i = pluviométrie parcellaire (aléatoire) ;
r_j = pluviométrie d'une rangée (fixe) ;
C_{ij} = effet « commun » rangée-parcelle.

Source de variation	SCE	d_{dl}	Variance	F_{cal}	$F_{0,05}$	$F_{0,01}$	
Totale	1 211,31	44	27,53				
Parcelle	285,49	4	71,37	4,08	(2,69)	(4,02)	×
Rangée	260,72	2	130,36	7,45	(4,46)	(8,64)	××
Effet « commun » rangée-parcelle	211,29	8	26,41	1,75	(2,27)		n.s.
Résiduelle.....	453,81	30	15,13				

$\hat{\sigma}^2_A = 6,25$ soit $\hat{\sigma}_A = 2,50$ mm avec $\sigma_A \leqslant 6,08$ mm test unilatéral au seuil $\alpha = 0,05$;
$\hat{\sigma}^2_E = 15,13$ soit $\hat{\sigma}_E = 3,89$ mm avec $\sigma_E \leqslant 4,99$ mm test unilatéral au seuil $\alpha = 0,05$.

Le modèle d'analyse de variance est alors un peu modifié par la prise en compte d'un facteur fixé « rangée » et l'apparition d'un effet « commun » aux pluviomètres

d'une même rangée dans une même parcelle (ce qui recouvre éventuellement une interaction parcelle × rangée).

L'effet rangée est significatif. Il peut être attribué à l'action du vent. L'effet « commun » rangée-parcelle n'étant pas significatif, cela signifie que le gradient de pluviométrie est le même quelle que soit la parcelle, c'est-à-dire qu'il est indépendant de la position respective des asperseurs. Il est donc justifié de sortir cet effet « rangée » de la résiduelle.

La variabilité inter-parcelle est estimée par σ_A^2. L'estimation de cette variance nous donne $\hat{\sigma}_A^2 = 6{,}25$, soit $\hat{\sigma}_A = 2{,}50$ mm. La valeur limite de l'intervalle de confiance nous donne $\sigma_A < 6{,}08$ mm. Ce qui, pour un apport d'eau moyen de 51,8 mm, nous assure un coefficient de variation inférieur à 11,7 p. 100.

Ce coefficient de variation limite reste très acceptable si on considère que la production de matière sèche de l'herbe n'est mesurée qu'avec des coefficients de variation

TABLEAU 4

Mesure des apports d'eau (en mm) *par minipluviomètre*
Measurement of water supply (in mm) *by mini pluviometers*
(disposition n° 2)
Irrigation 1977

$\bar{x}$	38,7	43,3	44,7	32,0	44,0	39,3	37,3	36,0
	38	40	46	32	48	44	40	38
	36	42	42	30	40	38	34	32
	42	48	46	34	44	36	38	38
	28	34	36	32	36	32	36	44
	28	36	36	30	34	36	38	36
	42	44	46	38	48	42	42	40
$\bar{x}$	32,7	38,0	39,3	33,3	39,3	36,7	38,7	40,0

$\bar{X} = 38{,}3$ mm

Source de variation	SCE	d_{dl}	Variance	F_{cal}	$F_{0,05}$
Totale	1 316,04	47	28,00		
Parcelle	625,80	15	41,72	1,93	(1,99)
Résiduelle	690,24	32	21,57		

$\hat{\sigma}_A^2 = 6{,}72$ soit $\hat{\sigma}_A = 2{,}59$ mm avec $\sigma_A \leqslant 5{,}11$ test unilatéral au seuil $\alpha = 0{,}05$;
$\hat{\sigma}_E = 4{,}64$ mm avec $3{,}98 \leqslant \sigma_E \leqslant 5{,}75$ test bilatéral au seuil $\alpha = 0{,}05$.

de l'ordre de 8 à 12 p. 100. Nous pouvons alors considérer que la variabilité des apports d'eau entre parcelles élémentaires ne devraient pas perturber notablement les courbes de croissance.

La variabilité intra-parcelle est mesurée par la variance de l'erreur σ_E^2 pour laquelle on trouve comme valeur limite maximum $\sigma_E \leqslant 4{,}99$ mm.

Il faut noter que σ_E intègre également les erreurs inhérentes à la mesure par les minipluviomètres : horizontalité, erreur de lecture à l'éprouvette, etc. Le coefficient d'uniformité de Christiansen,

$$C.U. = 100 \left[1 - \frac{\Sigma(x - \overline{X})}{n\overline{X}}\right],$$

calculé sur chacune des cinq parcelles, donne une valeur moyenne de 95 p. 100.

2.2. *Disposition n° 2* (tabl. 4 et 5).

Nous avons voulu vérifier ces premiers résultats au cours d'irrigations successives afin de faire varier les conditions générales :

— sens et vitesse du vent,

— variations de pression du réseau.

Nous éliminons cependant les irrigations correspondant à des situations trop extrêmes et nous nous sommes placés dans des conditions dites normales :

— vent moyen $\leqslant 2{,}5$ m/s,

— pression maintenue entre 2 et 2,5 kg/cm^2.

Nous avons voulu contrôler un plus grand nombre de parcelles et nous avons disposé seulement trois pluviomètres sur chacune d'elles.

Le tableau 4 présente les résultats d'une irrigation sur un ensemble de seize parcelles.

Le tableau 5 concerne quatre irrigations successives sur quatre blocs de sept parcelles. La totalité d'un essai ne pouvant être irrigué en une seule fois, l'effet « tour d'irrigation » doit être confondu avec l'effet bloc.

De ces deux séries de résultats, il ressort que :

• L'effet parcelle n'apparaît plus significatif, la variance résiduelle n'étant estimée qu'à partir de trois boîtes par parcelle au lieu de neuf ;

• Malgré l'absence de signification de l'effet parcelle, nous avons quand même déterminé la valeur limite de l'écart-type inter-parcelles. Nous obtenons :

$$0 \leqslant \sigma_A \leqslant 5{,}11 \text{ mm pour une irrigation de } 38{,}3 \text{ mm}$$

soit

$$C.V. < 13{,}34 \text{ p. } 100 \quad \text{(tabl. 4)} ;$$

$$0 \leqslant \sigma_{A/B} \leqslant 1{,}87 \text{ mm pour une irrigation de } 22{,}4 \text{ mm}$$

soit

$$C.V. < 8{,}37 \text{ p. } 100 \quad \text{(tabl. 5)}.$$

On confirme donc tout à fait les conclusions obtenues avec la disposition n° 1.

2.3. *Conséquences sur les mesures neutroniques.*

Si au sein d'une parcelle donnée, on admet que l'emplacement des trois pluvio-

TABLEAU 5

Mesure des apports d'eau (en mm) *par minipluviomètre*
(disposition n° 2)
Irrigation 1978

Measurements of water supply (in mm) *by mini pluviometers*

	1	2	3	4	5	6	7	
Bloc I 28/07	19,5	21,9	20,3	21,1	24,3	25,1	19,9	
	20,3	19,5	19,9	21,5	19,9	20,7	17,9	
	23,5	21,5	22,3	23,1	21,9	18,7	17,9	$\bar{x} = 20,98$ mm
Bloc II 29/07	21,1	22,7	22,3	20,9	22,5	19,5	21,7	
	21,9	18,5	20,3	19,9	19,1	18,9	18,7	
	25,5	20,3	21,5	23,7	24,7	20,5	22,5	$\bar{x} = 21,27$ mm
Bloc III 01/08	24,7	22,3	24,7	25,9	23,1	24,5	29,1	
	23,1	19,5	21,5	22,7	18,7	22,3	23,5	
	24,7	20,7	20,3	23,5	26,3	21,5	26,5	$\bar{x} = 23,29$ mm
Bloc IV 02/08	23,7	21,9	24,5	24,5	25,5	29,0	31,0	
	21,7	23,1	22,5	22,3	22,1	25,0	25,9	
	19,9	27,7	22,1	21,9	21,5	23,4	21,1	$\bar{x} = 23,82$ mm
								$\bar{X} = 22,35$ mm

Modèle analyse de variance (Hiérarchisé, entièrement aléatoire) :

$$\chi_{ijk} = \mu \times B_j + A/B_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

avec : B_j = effet Bloc (= effet tour d'irrigation) ;
A/B_{ij} = effet Parcelle à l'intérieur des Blocs.

Source de variation	SCE	d_{dl}	Variance	F_{cal}	
Totale	559,09	83	6,73		
Bloc	127,70	3	42,57	7,01	***
Parcelles dans Bloc.....	145,43	24	6,06	1,19	n.s. ($F_{0,05} = 1,70$)
Résiduelle	285,96	56	5,11		

Estimation des composantes de la variance

$\hat{\sigma}^2_E = 5,11$ soit $\hat{\sigma}_E = 2,26$ avec $1,99 \leqslant \sigma_E \leqslant 2,63$ au seuil $\alpha = 0,05$;
$\hat{\sigma}^2_{A/B} = 0,32$ soit $\hat{\sigma}_{A/B} = 0,56$ avec $0 \leqslant \sigma_{A/B} \leqslant 1,87$ au seuil $\alpha = 0,05$ (test unilatéral).

mètres soit celui de trois tubes de sonde à neutrons, la variabilité du terme I pour l'ensemble des tubes de l'essai est mesurée par la variance totale entre pluviomètres (σ^2_T).

Pour les deux séries d'irrigation concernant le dispositif 2, nous obtenons les estimations suivantes :

- $\hat{\sigma}^2_T = 28,00$, soit $\hat{\sigma}_T = 5,29$ mm avec test unilatéral $\alpha = 0,05$ $\sigma_T < 6,41$ mm d'où

$$\text{C.V.} < \frac{6{,}41}{38{,}3} = 16{,}74 \text{ p. } 100 \text{ ;}$$

- $\hat{\sigma}_T^2 = 6{,}73$, soit $\hat{\sigma}_T = 2{,}59$ mm avec test unilatéral $\alpha = 0{,}05$ $\sigma_T < 2{,}93$ mm d'où

$$\text{C.V.} < \frac{2{,}98}{22{,}4} = 13{,}30 \text{ p. } 100 \text{ .}$$

Cette variabilité n'est plus tout à fait négligeable. Il faut faire remarquer cependant que σ_T est l'écart-type entre des mesures de pluviométrie ; il prend en compte non seulement l'hétérogénéité réelle des apports d'eau, mais aussi les erreurs de mesure comme nous l'avons indiqué au paragraphe 2.1. De plus, il peut y avoir une certaine redistribution de l'eau à l'intérieur du couvert végétal et dans les premiers centimètres du sol. Cette redistribution pouvant soit diminuer l'hétérogénéité des apports, soit au contraire l'accentuer (ruissellement, effet d'entonnoir des feuilles, etc.).

Si nous appliquons l'équation du bilan simplifié $ETR = P + I \pm \Delta W$, au niveau de chaque tube, le terme I représente en fait la quantité d'eau qui s'est stockée autour du tube, dans la zone d'influence des neutrons, c'est-à-dire dans un cylindre de 10 à 20 cm de rayon. Il n'est pas évident que cette quantité d'eau soit en étroite corrélation avec celle recueillie dans un minipluviomètre placé au-dessus du tube de mesure.

Pour vérifier cette hypothèse, le paramètre I a été mesuré de deux manières :

I_p pluviométrie mesurée à l'emplacement du tube au moyen d'un minipluviomètre,

I_n pluviométrie estimée au moyen de deux mesures neutroniques effectuées la veille et le lendemain d'une irrigation.

Ces mesures ont été faites lors de deux irrigations les 20 et 21/09 et les 26 et 27/10/1978. L'expérimentation n'a porté que sur la moitié du dispositif, soit douze tubes seulement (deux blocs irrigués à tour de rôle à un jour d'intervalle).

Sur les six tubes d'un même bloc, nous avons pu obtenir une correspondance entre I_p et I_n pour chacune des irrigations (tabl. 6).

Les deux méthodes d'estimation du terme I aboutissent à des valeurs très proches l'une de l'autre (de 1 à 4 mm d'écart). La variabilité des deux types de mesures est du même ordre de grandeur.

Nous avons calculé les coefficients de corrélation entre I_p et I_n pour chacune des deux périodes d'irrigation :

1re période :

$$R(I_p \times I_n) = + 0{,}574$$

2e période :

$$R(I_p \times I_n) = + 0{,}595 \qquad (R_{0,05} = 0{,}58 \text{ pour } n = 12) \text{ .}$$

Ces corrélations sont relativement lâches bien qu'elles intègrent l'effet bloc, c'est-à-dire la différence d'apport d'eau existant entre les deux irrigations successives. Ceci tendrait à prouver qu'il y a une certaine redistribution de l'eau dans le couvert végétal et dans le sol.

3. — *Estimation de l'ETR*

L'estimation de l'ETR peut être alors réalisée de deux manières, soit ETR_p en intégrant I_p, soit ETR_n en intégrant I_n dans l'équation du bilan. Nous avons réalisé des

TABLEAU 6

Estimation de l'ETR (en mm d'eau) *avec les deux méthodes de mesure des apports d'eau* (I)
I_p = mesure par minipluviomètre au niveau de chaque tube
I_n = mesure par sondage neutronique avant et après irrigation
Période du 15/09/78 au 26/09/78

Estimation of water consumption (in mm) *with both methods of water supply measurement*
I_p = measurement by minipluviometer on each tube
I_n = measurement by neutronic gauge

Bloc 1 (irrigation du 20/09) — Bloc 2 (irrigation du 21/09)

	Parcelle A			Parcelle B						Parcelle C			Parcelle B					
Tubes	1	2	3	1	2	3	$\bar{x}$	σ	d	1	2	3	1	2	3	$\bar{x}$	σ	d
ΔW	5,2	11,7	16,7	21,7	17,7	20,6	15,6	6,18	(6,48)	23,2	14,7	24,0	20,4	22,9	29,1	22,4	4,73	(4,96)
P	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7			0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7		
I_1	27,5	35,8	47,6	31,4	38,6	40,6	36,9	7,08		40,6	45,4	48,1	46,6	40,6	39,4	43,5	3,69	
I_2	26,7	38,6	46,9	42,7	33,6	38,6	37,9	7,06		44,8	40,0	44,7	41,4	46,8	49,5	44,5	3,47	
ETR_1	23,0	24,8	31,6	10,4	21,6	20,7	22,0	6,89	(7,23)	18,1	31,4	24,8	26,9	18,4	11,0	21,8	7,34	(7,70)
ETR_2	22,2	27,6	30,9	21,7	16,6	18,7	23,0	5,39	(5,66)	22,3	26,0	21,4	21,7	24,6	21,1	22,9	1,99	(2,09)

Période du 26/09 au 13/10

(irrigation du 26/09) — (irrigation du 27-09)

ΔW	11,0	5,7	15,8	3,3	6,3	8,4	8,4	4,45	(4,67)	0,7	9,5	6,2	8,9	10,6	3,2	6,5	3,90	(4,09)
P	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1			5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1		
I_1	39,4	33,8	40,8	33,2	34,8	34,0	36,0	3,25		37,0	41,8	42,2	45,4	49,3	49,3	44,2	4,80	
I_2	40,1	37,0	42,0	32,6	37,0	40,4	38,2	3,38		38,0	40,1	39,6	44,3	42,3	38,0	40,4	2,49	
ETR_1	33,4	33,2	30,1	35,0	33,6	30,7	32,7	1,88	(1,97)	41,4	37,4	41,4	41,6	43,8	51,2	42,8	4,63	(4,86)
ETR_2	34,2	36,4	31,3	34,4	35,8	37,1	34,9	2,08	(2,18)	42,4	35,7	38,5	40,5	36,8	39,9	39,0	2,47	(2,59)

Les chiffres entre parenthèses représentent la précision des mesures : d ($\alpha = 0{,}05$).

Intervalle de confiance des mesures : $d = \sqrt{\frac{t_\alpha^2 \times \sigma_E^2}{n}}$.

mesures de consommation pendant des périodes encadrant les irrigations précédentes, soit période du 15/09 au 26/09 et période du 26/09 au 13/10. Les résultats sont reportés sur le tableau 6. Les moyennes obtenues par les deux méthodes sont très voisines.

La variabilité de ETR_n semble en général inférieure à celle de ETR_p. Ceci est particulièrement vrai pour le deuxième bloc lors de la première période où la variance de ETR_p est significativement supérieure à celle de ETR_n

$$F = \frac{\hat{\sigma}^2_{ETRp}}{\hat{\sigma}^2_{ETRn}} = 13{,}60 \qquad (F_{0,01} = 10{,}97)\,.$$

L'intervalle de confiance de ETR_n est inférieure à 3 mm sauf pour le bloc 1 lors de la première période. Ceci semble correspondre en fait à une irrigation particulièrement hétérogène ($\sigma = 7{,}06$ mm).

ETR_p peut aboutir à une estimation aussi précise que ETR_n (Bloc 1, 2e période).

Si on se fixe un intervalle de confiance minimum de 4 mm environ, ce qui représente la consommation journalière moyenne en été, on peut noter que ce seuil serait dépassé :

- une fois sur quatre avec ETR_n,
- trois fois sur quatre sur ETR_p.

Il semble donc que l'estimation de ETR_n soit effectivement plus précise que l'estimation ETR_p.

Si on s'était abstenu de toute mesure sur I en considérant ce terme du bilan comme constant d'un tube à l'autre (estimé à partir des caractéristiques de fonctionnement du réseau), la précision obtenue sur ETR serait alors la même que celle de ΔW.

On s'aperçoit alors (tabl. 6) que trois fois sur quatre, l'estimation de l'ETR avec I constant est plus précise que celle obtenue en mesurant I avec des minipluviomètres, alors que la mesure de I par sondage neutronique conduit dans tous les cas à une amélioration très sensible de la précision.

IV. — Conclusion

L'ensemble de ces résultats préliminaires semble répondre positivement au problème posé, à savoir est-il possible d'établir des bilans hydriques hebdomadaires sous prairie avec une précision inférieure à la consommation journalière moyenne en eau : soit 4 mm environ ?

Huit tubes peuvent largement suffire lorsqu'il n'y a pas d'apport d'eau d'irrigation. Dans le cas contraire et même en s'assurant d'une irrigation aussi régulière que possible, douze tubes semblent nécessaires pour obtenir une précision analogue.

La recherche d'une trop grande précision risque d'être illusoire s'il s'avère que le terme de drainage n'est plus négligeable et, de plus, lui-même variable. La détermination de ce dernier passe par celle de la conductivité hydraulique du sol $K(\theta)$ en dessous de la zone prospectée par les racines (Vauclin et Vachaud, 1976). Dans nos conditions, les racines de fétuque élevée prospectent le sol jusqu'à 2 m environ. Nielsen et Biggar (1973) ont montré que la variabilité de $K(\theta)$ pouvait être importante. En fin de compte, seule une vérification ponctuelle de l'hypothèse d'un drainage négligeable peut être envisagée dans le cadre d'une telle étude.

La prise en compte de la variabilité des apports d'eau au niveau de chaque tube doit permettre d'augmenter la précision des bilans. La mesure de la pluviométrie ponctuelle ne semble pas suffisamment corrélée avec les quantités d'eau qui se stockent autour du tube ; l'intégration de cette mesure dans l'équation du bilan n'augmente pas la précision, mais aurait plutôt tendance à la diminuer.

La mesure directe des apports d'eau par sondage neutronique avant et après irrigation permet de réduire notablement la variabilité des bilans hebdomadaires. Cette méthode a cependant l'inconvénient d'être assez lourde.

Il aurait été intéressant d'analyser de cette manière la variabilité des pluies orageuses estivales et leur conséquence sur la précision des bilans. Nous n'avons pas eu la possibilité d'encadrer le type de précipitations avec des mesures neutroniques, mais nous avons pu constater que chaque fois, la précision de nos bilans était affectée et ce, d'autant plus que les pluies étaient abondantes et brutales.

Reçu pour publication en juillet 1980.

Remerciements

Nous tenons à remercier M. P. Vincourt (Station d'Amélioration des Plantes Fourragères I.N.R.A., 86600 Lusignan) pour l'aide qu'il nous a apportée dans l'interprétation statistique des données.

Summary

Development of an experimental device to follow the water demand of a meadow during its growth

This preliminary work aimed at testing a device to measure the weekly water demand of a meadow within a study of the relationships between the increase in dry matter, the nitrogen absorption and the evapotranspiration (ETR) of the plant canopy.

The ETR was measured by weekly water balances carried out with the neutron probe.

The accuracy of these balances was analysed. A method which allows to take into account the variability of the water supplies due to irrigation was developped which makes it possible to increase sensibly the accuracy of the ETR measurements : with eight measurement tubes for each treatment the error remains inferior to 4 mm (which represents the mean daily demand).

The saving of measurement tube made is however compensated by the necessity to check each irrigation by neutronic measurements.

Zusammenfassung

Richtigstellung einer Versuchsvorrichtung für die Messung des Wasserverbrauchs einer Wiese während ihres Wachstums

Der Zweck dieser vorläufigen Arbeit war es, eine Messungsvorrichtung für den wöchentlichen Wasserverbrauch einer Wiese im Rahmen einer Untersuchung der Beziehungen zwischen der Trockensubstanzenzunahme, der Stickstoffabsorption und der Evapotranspiration (ETR) der Pflanzendecke zu prüfen.

Die Messungen der Evapotranspiration wurden infolge von mit Neutronensonde wöchentlich gemachten Wasserbilanzen erzielt.

Die Genauigkeit dieser Bilanzen wurde untersucht. Eine Methode, die die Schwankungen der Wasserzufuhr durch Bewässerung berücksichtigt, wurde erforscht, was die Genauigkeit der Evapotranspirationmessungen erheblich verbessert mit acht Messungsröhren pro Behandlung verbleibt der Fehler kleiner als 4 mm (was dem mittleren Tagesverbrauch entspricht).

Der Gewinn an Messungsröhre ist trotzdem durch die Notwendigkeit ausgeglichen, jede Bewässerung durch Neutronenmessungen zu überprüfen.

РЕЗЮМЕ

Разработка опытного прибора для изучения потребления воды во время вегетации луга.

Целью нашей работы — испытание прибора измерения еженедельного потребления воды луга в рамках изучения зависимости увеличения массы сухого вещества от поглощения азота и эвапотранспирации /ЭТР/ растительного покрова.

Нейтронный зонд доставил еженедельные водные балансы для измерения ЭТР.

Авторы изучают точность этих балансов и описывают метод, который учитывает изменчивость норм поливной воды. Этот метод повышает значительно точность измерений ЭТР : в случае употребления 8 измерительных трубок на обработку, ошибка ниже 4 мм /= среднее ежедневное потребление/.

Из-за маленького количества использованных измерительных трубок, нужно проверить каждое орошение с помощью нейтронных измерений.

Références bibliographiques

DAGNÉLIE P., 1969. *Théorie et Méthodes statistiques*. E. J. Duclot S.A. Gembloux.

MAERTENS C., MORIZET J., STUDER R., 1965. Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons. *Ann. agron.* **16** (1), 5-23.

MARCESSE J., 1969. Les techniques nucléaires dans les problèmes d'alimentation en eau du sol et des plantes. *B.I.S.T. Commissariat à l'Energie atomique*, nº 141.

NIELSEN D. R., BIGGAR E. R. H., 1973. Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia* **42,** 215-259.

PEYREMORTE P., PHILLIPEAU G., MARCESSE J., 1972. *Optimisation de l'échantillonnage pour déterminer les bilans hydriques sous culture au moyen de l'humidimètre à neutron*. International Atomic Energy Agency Vienne, SM 151/21, 631-647.

SCHEFFE H., 1959. *The analysis of variance*. John Wiley and Sons. Inc. New York-London, 477 p.

VAUCLIN M., VACHAUD G., 1976. Bilan d'eau sur sol nu et cultivé : fiabilité des résultats. *Journées Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique*, Cadarache.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 473-485.

Caractères et réserves hydriques des sols sur craie et sur graveluches en Champagne

J. L. BALLIF

Station de Science du Sol, I.N.R.A.,
Route de Montmirail, Fagnières,
51000 *Châlons sur Marne*

Résumé

Les caractéristiques hydriques et l'évolution de la réserve en eau de sols développés sur craie cryoturbée ou sur graveluches sont comparées.

Sur craie, les sols se ressuient rapidement et se dessèchent en surface. Mais ils ont une bonne réserve hydrique en profondeur dont bénéficient les cultures à enracinement profond. Cette réserve, renouvelée par les transferts d'eau dans la craie, est saturée à 53 p. 100 de la porosité totale pendant les périodes de sécheresse.

Sur graveluches, les sols ont en surface des réserves comparables à celles des sols sur craie. Leur ressuyage peut être ralenti par la présence d'un encroûtement. En profondeur, la réserve en eau de la graveluche est toujours plus faible que celle de la craie. En année sèche, l'eau peut donc être le facteur limitant des rendements.

En Champagne Crayeuse, le potentiel hydrique des sols dépend donc essentiellement de la nature du sous-sol (craie ou graveluche).

Introduction

Au cours des vingt-cinq dernières années, la Champagne vient de connaître un développement agronomique très important. Les sols développés sur la craie étant naturellement très pauvres, cette réussite est due en grande partie à la mise au point d'une fertilisation minérale équilibrée. Toutefois, si les rendements des cultures d'hiver sont régulièrement bons, il existe parfois d'assez fortes différences dans les cultures de printemps liées à la nature des sols et principalement de leur sous-sol.

En effet, d'une manière simplifiée, on distingue deux types de sols en pays de craie :

— les rendzines brunes développées sur paléosol cryoturbé relié directement à la craie (c'est le cas le plus général concernant 60 à 75 p. 100 des surfaces) et

— les rendzines brunes développées sur « graveluches », accumulations de sables et graviers de craie de un à plusieurs mètres d'épaisseur (cas particuliers représentant 10 à 15 p. 100 des surfaces) répartis sur les sommets et les versants.

Pour mieux connaître le régime hydrique de ces sols, il a été effectué des profils hydriques sur le terrain, régulièrement pendant quatre années, et les études ont été complétées par des mesures en laboratoire sur les divers matériaux caractérisant les divers horizons de ces sols. Le travail présenté réalise la synthèse des résultats obtenus sur les caractéristiques hydriques et l'évolution de la réserve en eau des sols développés sur craie et sur graveluches.

1. — Le milieu naturel de l'étude

1.1. — *Le climat*

Le climat de la Champagne crayeuse est relativement doux et humide, soumis aux influences atlantiques et continentales. A Châlons, la hauteur moyenne des précipitations annuelles est de 633 mm, la température moyenne annuelle de 9,9 °C, l'évapotranspiration potentielle moyenne de 708 mm (E.T.P.-TURC). Ce climat se caractérise par des hivers peu pluvieux, marqués par l'alternance de périodes froides et de périodes humides, des printemps secs et froids, des étés chauds avec des orages et des automnes pluvieux avec des brouillards.

1.2. — *Les sols*

Pour cette étude, il a été retenu quatre secteurs correspondant aux rendzines brunes sur craie (lieux-dits : Tournant-du-Puits, Mont-Pourpoint, Mont-du-Mesnil, Finet de Sarry) et un secteur correspondant aux rendzines sur graveluches. Ces points de mesures sur craie et sur graveluches sont situés dans les environs de Châlons (fig. 1).

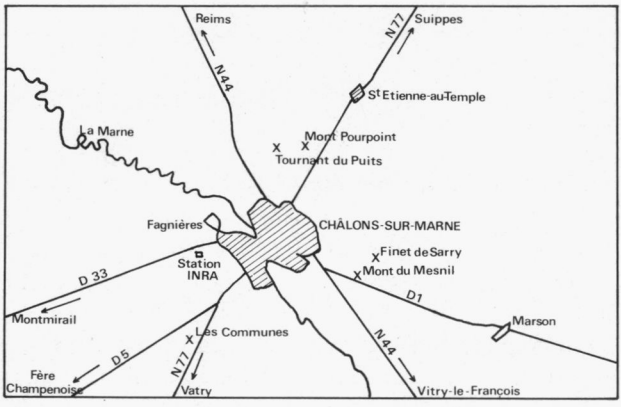


FIG. 1. — *Situation des points de mesures.*
Site of measures.

Description d'une rendzine sur craie (*exemple du secteur* : Le Tournant-du-Puits).

Ap 0-20 cm : Horizon de surface de couleur brun gris, de structure grumeleuse et polyédrique, contenant 28 p. 100 d'éléments grossiers, à texture moyenne (limono-

argilo-sableuse), excessivement calcaire (64 p. 100), moyennement pourvu en matière organique (3,2 p. 100).

20-35 cm : Horizon de couleur brune, de structure grumeleuse, contenant 28 p. 100 d'éléments grossiers, excessivement calcaire (66 p. 100), pauvre en matière organique (2,4 p. 100).

IIA_1 IIC 35-70 cm : Horizon hétérogène comprenant :

— des poches de couleur brune à châtain clair, remplies d'un matériau à dominance de sables grossiers de craie (1 à 2 mm), compact et dur,

— des cheminées d'ascension de pierres et de cailloux de craie émoussés, redressés obliquement et verticalement, emballés dans une pâte calcaire blanche, friable et poreuse, avec fréquemment des pseudomycéliums calcaires.

IIC 70-120 cm : Horizon de couleur blanche, contenant surtout des éléments de la roche-mère, débités en plaquettes, remaniés par cryoturbation, très fissurés, très perméables, avec de nombreux pseudomycéliums calcaires.

R 120-150 cm : Horizon de couleur blanche, correspondant à la roche-mère en place non remaniée, à stratification subhorizontale, avec des fissures verticales et horizontales, remplies en partie d'un dépôt gris-brun et utilisées par les racines.

Les horizons cryoturbés ont une épaisseur variable selon les secteurs. L'horizon de craie non remaniée est donc rencontré à 90 ou 120 cm de profondeur.

Description d'une rendzine sur graveluches (au lieu-dit Les Communes).

Ap 0-25 cm : Horizon de surface, de couleur brune, de structure grumeleuse, contenant une grande proportion d'éléments grossiers, crayeux (47,0 p. 100), à texture moyenne (limono-argilo-sableuse), excessivement calcaire (71,0 p. 100), moyennement pourvu en matière organique (3,1 p. 100).

25-50 cm : Horizon de couleur brun-gris, contenant une grande proportion d'éléments grossiers (42,5 p. 100), pratiquement calcaire en totalité (90,5 p. 100).

C_1 50-60 cm : Horizon de couleur blanc jaunâtre, compact, formé de quelques graviers englobés dans une pâte calcaire (« tuf ») d'épaisseur irrégulière, peu perméable.

C_2 60-130 cm : Horizon très filtrant, formé de lits successifs de sables grossiers et de graviers renfermant quelques gros cailloux de craie, avec de nombreux pseudomycéliums calcaires.

2. — Les mesures hydriques et physiques

Sur ces deux types de sols, des profils hydriques sont effectués avec quatre répétitions, de la surface du sol à 100 ou 150 cm de profondeur, par tranche de 10 cm, à l'aide d'une tarière de 45 mm de diamètre. La teneur en eau des échantillons est déterminée par pesée avant et après passage à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant. Ces profils sont réalisés une fois par semaine ou par quinzaine, à jour fixe, en sol nu ou cultivé : en blé (1967-1969-1970) sur rendzine développée sur craie, en betteraves sucrières et en blé (1968-1969-1970) sur rendzine développée sur graveluche.

Afin d'exprimer les teneurs en eau en volume et de rapporter ces valeurs à la saturation (porosité totale), des mesures de volumes apparents sont réalisés sur les

différents horizons des sols à l'aide d'un voluménomètre à membrane. Ces données et celles des volumes réels servent à la détermination de la porosité totale.

Les teneurs caractéristiques en eau de ces sols sont déterminées par les méthodes suivantes :

— *La capacité au champ* par les méthodes des paliers : méthode graphique des humidités en fonction du temps, et méthode statistique (Féodoroff *et al.*, 1969). Cette teneur en eau caractéristique est définie de la manière suivante : « la capacité au champ est l'humidité d'un sol ressuyé à partir d'un état de saturation plus ou moins complet » (Féodoroff, 1962). Pour déterminer cette valeur caractéristique nous avons donc retenu les teneurs en eau de périodes de ressuyage du sol. Sur un graphique d'humidité en fonction du temps, ces valeurs restent constantes et apparaissent sous forme de paliers.

Ces paliers sont également fixés objectivement par calcul statistique. Mais comme dans le programme utilisé n'entrent que les informations concernant les humidités, les valeurs affectées par de fortes précipitations sont éliminées. Les moyennes des paliers retenus sont comparables à celles obtenues par la méthode graphique.

— *Le point de flétrissement* : pF = 4,2 et les teneurs en eau aux pF = 3,7 (seuil critique) et 2,7, obtenus à l'aide des extracteurs à plaque et à membranes poreuses (appareils de Richards).

3. — Caractéristiques

3.1. — *Caractéristiques physiques* (tabl. 1)

En surface, dans les deux cas d'expérience, le sol (0-25 cm) présente normalement une bonne porosité totale.

Dans l'horizon de craie cryoturbée, la porosité totale varie de 41 à 55 p. 100 selon l'emplacement : intérieur de poche ou cheminée de craie ; à l'intérieur de certaines poches, la porosité totale est faible (34-39 p. 100).

Dans la craie en place, entre 90 et 150 cm de profondeur, la densité apparente varie de 1,33 à 1,45 selon l'importance du réseau et des ouvertures des fissures. La porosité totale est de 41 à 51 p. 100 ; celle de fragments de craie est plus faible (36 à 44 p. 100) : la porosité de fissure de la craie est donc de l'ordre de 3 à 10 p. 100. La porosité, à géométrie fixe, des fragments de craie est formée de pores ouverts de 0,3 à 3 μ de diamètre (Ballif, 1978).

Dans la graveluche, entre 60 et 120 cm de profondeur, la porosité totale est faible. Celle du tuf est encore plus faible.

3.2. — *Caractéristiques hydriques* (tabl. 1)

— *En surface* (0-25 cm). *La capacité au champ* est de 20,7-21,5 p. 100 g, avec un intervalle de confiance de 0,8 à une probabilité de 95 p. 100. Des valeurs comparables (21,0-22,2 p. 100) sont obtenues également en avril dans un sol bien humecté et recouvert d'un film de polyéthylène transparent (Ballif et Dutil, 1971). En effet « la capacité au champ est l'humidité d'une terre, qui ayant été bien humectée par des pluies abon-

TABLEAU 1

Caractéristiques physiques et hydriques des sols
Physical and water characteristics of the soils

Horizons	Profondeur en cm	Densité apparente g/cm³	Porosité totale cm³/100 cm³	Capacité au champ g/100 g	pF g/100 g de terre séchée à 105 °C		
					2,7	3,7	4,2
Surface	0-20/30	1,15-1,20	55-62	20,7-21,5	22,2-23,1	14,2-14,5	10,6-11,5
Intérieur de poche	40-70	1,30-1,39	34-39	17,5-17,8	16,6-18,7	7,9-9,3	3,5-5,0
Cheminée de craie	40-60	1,20-1,40	46-56				
Craie remaniée ..	80-120	1,21-1,31	41-55	25,7	23,9-24,0	7,7-8,7	2,5-2,6
Craie en place ...	90-150	1,33-1,45	41-51	25,0-26,9	21,0-26,6	3,2-6,2	1,2-1,7
Graveluche	60-120	1,32-1,57	41-43	17,7			2,3
Tuf	45-55	1,72	32-36		30,0	17,5	1,3

dantes par exemple, est abandonnée au ressuyage pendant quelques jours en protégeant la terre contre l'évaporation » (Hénin, 1969).

A la capacité au champ, l'eau n'occupe que 40 à 50 p. 100 de la porosité ou 25 p. 100 du volume global du sol.

La teneur en eau au *point de flétrissement*, pF 4,2 est très faible : 10,6-11,5 p. 100.

— *En profondeur.*

Dans l'horizon de craie cryoturbée (40-100 cm), la capacité au champ varie de 17,5-17,8 p. 100 à l'intérieur des poches, à 25,7 p. 100 dans la craie remaniée. La teneur en eau au point de flétrissement est très faible (2,5-5,0 p. 100).

Dans la craie en place (90-150 cm), la capacité au champ est de 25,0-26,9 p. 100, ce qui correspond à un remplissage de 67 à 84 p. 100 de la porosité totale, soit de 33 à 39 p. 100 du volume global du sol. La teneur en eau au point de flétrissement est excessivement faible (1,2 à 1,7 p. 100).

Dans la graveluche (60-120 cm), la teneur en eau à la capacité au champ est plus faible (17,7 p. 100) que celle de la craie. A cette teneur caractéristique, l'eau n'occupe que 46 à 52 p. 100 de la porosité totale, soit 25 p. 100 du volume global du sous-sol.

3.3. — *Vitesse d'infiltration* (fig. 2)

Les résultats de profils hydriques réalisés avant et après une pluie d'orage en sol sur craie au Mont-du-Mesnil, les 11 et 15 septembre 1967 permettent de donner une première mesure de la vitesse de pénétration de la pluie en période estivale.

Le profil hydrique du 11 septembre présente un déficit en eau avec un volume d'eau de 309 mm entre 0 et 120 cm. Le 14 septembre, l'orage commence à 16 h, avec de fortes pluies en soirée et durant la nuit (49,4 mm). Le 15, le profil hydrique est réalisé à 9 h, soit 17 h après le début de l'orage. Le volume d'eau, dans la même profondeur du sol, est de 354 mm, soit une augmentation de 45 mm. La capacité au champ est dépassée en surface.

La vitesse de pénétration de la pluie (vitesse d'infiltration et de redistribution) serait donc égale à : $V = 120/17 = 7{,}0$ cm/h ou 169 cm/jour, valeur très supérieure

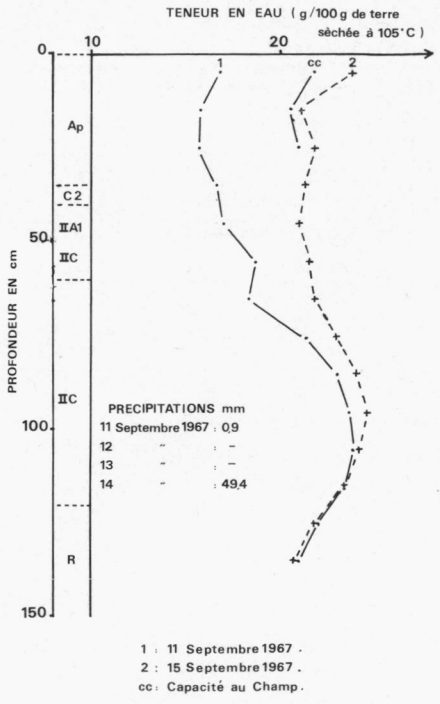


FIG. 2. — *Infiltration d'une pluie d'orage.* Sol nu sur craie. Mont du Mesnil.
Infiltration of thunder rain. Bare soil on chalk. Mont du mesnil. cc : field capacity.

à celle mesurée en sol de limon, 60 cm/jour (Féodoroff et Ballif, 1969). Ainsi, après une pluie, le ressuyage des sols sur craie est rapide.

En période hivernale, sur les cases lysimétriques de la Station, le temps de réponse du drainage aux précipitations est mesuré. La vitesse du flux d'eau dans le sol, de la surface à 150 cm de profondeur, serait de l'ordre de 8 cm/h. La vitesse de circulation de l'eau dans la craie entre 150 et 200 cm de profondeur serait de l'ordre de 2 cm/h (Ballif *et al.*, 1975).

4. — Réserves en eau de sols sur craie et sur graveluche

4.1. — *Capacité de réserve hydrique* (tabl. 2)

La capacité de réserve hydrique est la quantité d'eau utilisable qui est emmagasinée dans une épaisseur de sol déterminée, généralement épaisseur exploitée par les racines.

Pour chaque horizon du profil, cette capacité de réserve en eau, R, exprimée en mm est obtenue par la relation suivante :

$$R = p.d. (c - f)$$

où :

p = profondeur de l'horizon en dm,

d = densité apparente, g/cm³,

c = capacité au champ, g/100 g,

f = point de flétrissement, g/100 g.

La capacité de réserve en eau du sol sur craie, sur 150 cm de profondeur, est plus importante (420 mm) que celle du sol sur graveluche (340 mm). *L'augmentation de la capacité du réservoir est de 80 mm* ; la différence de quantité d'eau est moins grande en surface (20 mm) qu'en profondeur (30 mm) (cf. tabl. 2 : réserves hydriques par tranche de 50 cm).

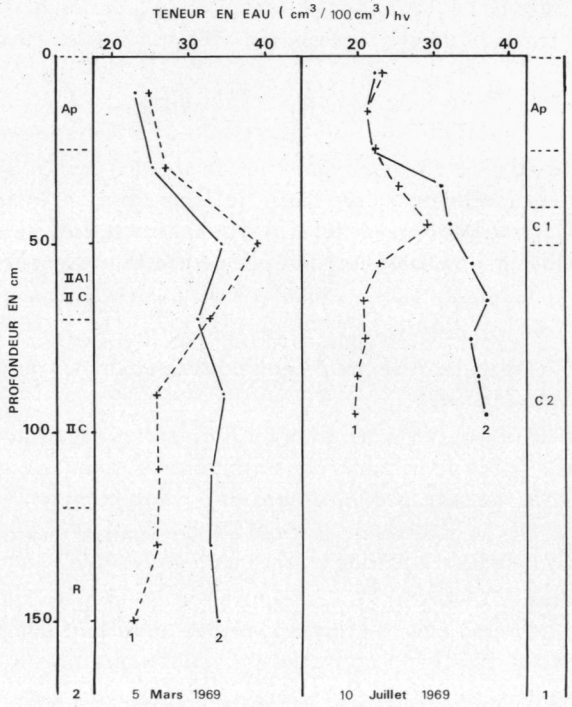


FIG. 3. — *Profils de la réserve hydrique de sols sur craie et sur graveluche cultivés en blé, en mars et en juillet* 1969.

Profiles of water reserve of wheat cropped soils on chalk and on chalky gravels, in March and July 1969.

1. Sol sur graveluche « Les Communes ». Soil on chalky gravels.
2. Sol sur craie « Mont Pourpoint ». Soil on chalk.

TABLEAU 2

Réserve hydrique des sols (en mm)
Water reserve of the soils (in mm)

Profondeur (en cm) (Depth)	Sols (Soils)	
	sur craie (on chalk)	sur graveluche (on chalky gravel)
0-50	110	90
50-100	150	120
100-150	160	130
0-150	420	340

4.2. — *Evolution de la réserve hydrique des sols*

Sols cultivés en blé en 1969, année caractérisée par un hiver légèrement sec (127 mm), un printemps et un été pluvieux (184-141 mm), un automne excessivement sec (13 mm).

Quelques profils hydriques présentent la répartition du volume de l'eau dans le sol sur craie (Mont Pourpoint) et le sol sur graveluche (Les Communes) (fig. 3) :

— *En mars*, le volume d'eau de l'horizon de surface du sol sur graveluche est légèrement supérieur à celui du sol sur craie : le drainage étant moins bon dans ce sol à cause de la présence de l'horizon du tuf (C_1). Par contre, le volume d'eau de la graveluche, entre 70 et 150 cm de profondeur, est inférieur à celui de la craie.

— *En juillet*, le volume d'eau des horizons de surface est identique ; en profondeur, les volumes sont très différents (37-20 cm^3/100 cm^3).

De mars à novembre, les réserves en eau de ces deux types de sols présentent les variations suivantes (fig. 4) :

— *En surface* (0-30 cm), en mars et en avril, la réserve en eau du sol sur graveluche est supérieure à celle du sol sur craie. Cette réserve diminue ensuite pour chaque type de sol jusqu'à la moisson pour atteindre un niveau faible en novembre. A cette date, le sol sur graveluche, déchaumé et travaillé, a une réserve plus élevée que celle du sol sur craie, sur lequel en août une luzerne a été implantée.

— *En profondeur* (70-100 cm), la réserve en eau de la graveluche est plus faible que celle de la craie remaniée ; l'écart est surtout important (50 mm) au début de juillet : la réserve de la graveluche approche du seuil critique alors que celle de la craie n'a pas encore diminué.

Les rendements des deux blés sont de 50 q/ha sur le sol de craie et de 49 q/ha sur le sol de graveluche. L'eau n'a pas été un facteur limitant pour les céréales au cours de cette campagne. Le déficit climatique (E.T.P.-P.) n'apparaît qu'en juillet.

Ainsi, au cours de l'année 1969, la réserve en eau de l'horizon de surface de sols sur craie et sur graveluche a suivi la même variation. En profondeur, pendant toute l'année, *la réserve en eau de la graveluche est inférieure à celle de la craie*. Cette réserve

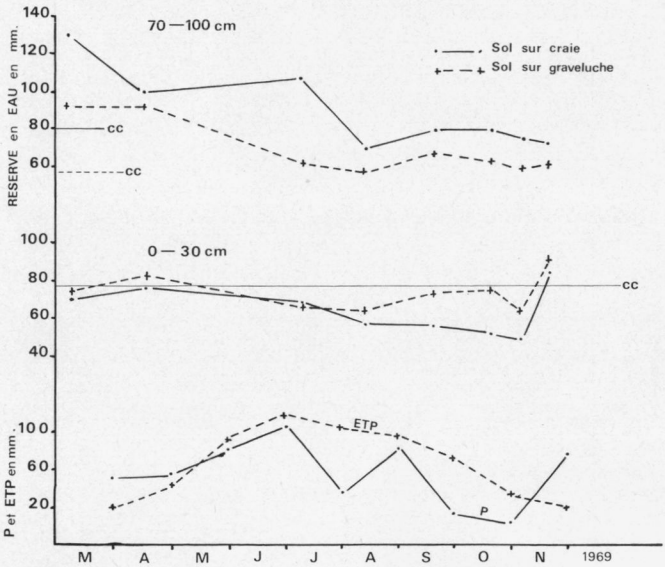


FIG. 4. — *Evolution de la réserve en eau de différents horizons de sols sur craie et sur graveluche, cultivés en blé.*

Evolution of water reserve of various horizons of wheat cropped soils on chalk and on chalky gravels.

Sol sur craie. Soil on chalk.
Sol sur graveluche. Soil on chalky gravels.

est descendue à un niveau très faible malgré un printemps et un été pluvieux (mars à juillet = 325 mm).

4.3. — *Réserves théorique et réelle du sol sur craie*

Le bilan de la réserve théorique en eau du sol sur craie cultivé en blé est établi à partir du 1er mars 1967, en prenant pour seuil la réserve réelle du sol sur 100 cm d'épaisseur, soit 293 mm. Cette valeur diminue ou augmente selon le déficit climatique (E.T.P.-P). En mai, après des pluies printanières normales, la réserve théorique diminue de moitié. A la fin de juin, mois légèrement sec (44 mm), cette réserve est totalement épuisée (fig. 5).

La réserve réelle est connue par les mesures de profils hydriques échelonnées au cours de la saison. A partir du mois d'avril, cette réserve est supérieure à la réserve théorique et atteint une différence de 155 mm au début du mois de juillet et de 208 mm le 21 août. Cette quantité d'eau supplémentaire est fournie par la réserve en eau de la craie en profondeur. Ceci a été confirmé par les différences observées entre ces réserves réelle et théorique au cours de la sécheresse centennale de 1976 (Ballif, 1977). La remontée de cette eau serait facilitée par la porosité continue de la craie (Ballif, 1978).

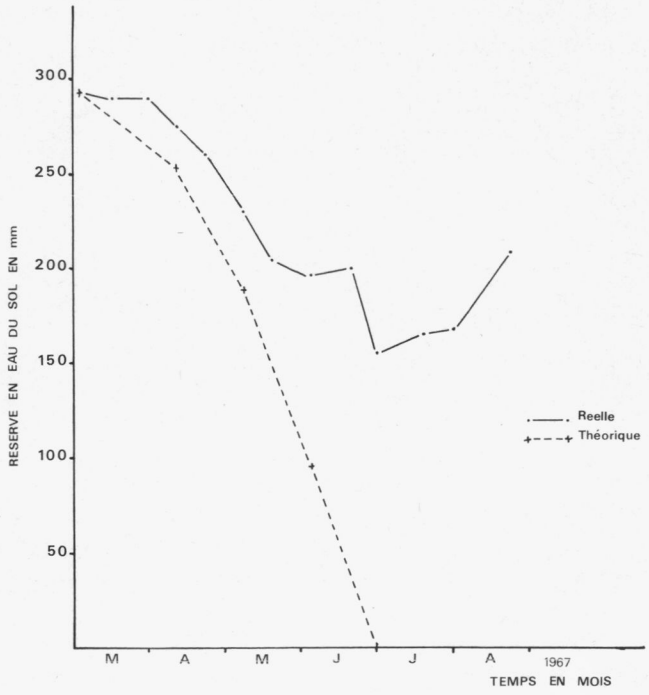


FIG. 5. — *Réserves réelle et théorique du sol sur craie* (0-100 cm) *cultivé en blé en* 1967.
Real and theoretical water reserves of wheat cropped soil on chalk (0-100 *cm*) *in* 1967.

4.4. — *Amplitudes annuelles des réserves en eau*

D'après les résultats obtenus, l'amplitude des réserves en eau des sols cultivés ou sans végétation, sur craie et sur graveluche, présente les variations suivantes :

— *Avec un été légèrement sec* (1967, juin et juillet = 88 mm) en sol de craie, la réserve en eau de l'horizon de surface s'abaisse à 35 mm sous une culture de blé. *Cette faible réserve est voisine de celle au point de flétrissement.*

Dans la craie, l'amplitude des réserves en eau du sol cultivé ou non est identique. La réserve à partir de 90-100 cm est peu affectée par la sécheresse. Ainsi, pendant la période de prélèvement intense par la plante, qui correspond également à la période de sécheresse estivale, la réserve en eau de la craie peut fournir l'eau indispensable au développement de la plante.

— *Avec un été pluvieux* (1968, juin et juillet = 120 mm) sur graveluche, la réserve en eau de l'horizon de surface, couvert de betteraves sucrières, s'abaisse également à un niveau voisin de celui du point de flétrissement. Celle du sol non cultivé a un niveau plus élevé (60 mm). La même différence est constatée dans la graveluche : sous les betteraves, entre 50 et 100 cm de profondeur, la plus faible réserve en eau est de

125 mm. Les prélèvements en eau par la plante sont donc importants ; même avec un été pluvieux, la réserve en eau du sol cultivé est faible.

— *Avec un printemps et un été humide* (1969), en sols sur craie et sur graveluche, cultivés en blé, la réserve en eau des horizons de surface diminue moins qu'au cours des deux années précédentes. Les réserves extrêmes en eau de la craie sont plus importantes que celles de la graveluche. La différence en année sèche devrait être plus grande.

Il apparaît donc que les conditions climatiques font varier la réserve hydrique des horizons de surface des deux types de sols développés sur la craie et sur la graveluche, et du sous-sol formé de graveluche, alors qu'elles modifient peu celles de la craie. Des essais d'irrigation sur sol de craie cultivés en betteraves sucrières et conduits pendant cinq années consécutives n'ont pas donné de résultats significatifs (C.R. I.T.B. 1971). Ceci confirme l'excellente réserve en eau des sols sur craie et explique la réussite d'une autre culture à enracinement profond, la luzerne, occupant le sol pendant les périodes de sécheresse estivale.

Les sols calcaires, légers et perméables, se dessèchent facilement en surface, mais l'eau de la craie sous-jacente constitue une réserve très importante. Les plantes, enracinées profondément, ne risquent pas de souffrir de la sécheresse. Par contre, sur graveluche, la réserve en eau est faible et non renouvelable, les végétaux dépérissent par les fortes chaleurs (Radet, 1943).

Conclusion

Le potentiel hydrique des sols calcaires de Champagne dépend essentiellement de la nature du matériau sous-jacent : craie ou graveluche.

Les sols sur craie, par leurs caractéristiques physiques très favorables, se ressuyent rapidement et se dessèchent en surface. Mais ils ont une bonne réserve hydrique en profondeur dont bénéficient les cultures à enracinement profond. Cette réserve peut être renouvelée par les transferts d'eau dans la craie. Ce renouvellement permet de maintenir le taux de saturation à 53 p. 100 de la porosité totale pendant les périodes de sécheresse. La remontée de cette eau est facilitée par la porosité continue de la craie, mais elle serait interrompue par le passage dans l'horizon de craie cryoturbée.

Les sols sur graveluche ont en surface des réserves en eau comparables à celles des sols sur craie. Leur ressuyage peut être ralenti par la présence d'un horizon de tuf. En profondeur, la réserve en eau de la graveluche est toujours plus faible que celle de la craie quelle que soit la saison. En conséquence, le niveau des réserves en eau de ces sols reste soumis aux aléas climatiques. En année sèche, sur ce type de sol, l'eau peut donc être le facteur limitant des rendements.

Les sols de Champagne crayeuse ont donc une économie en eau différente selon qu'ils reposent sur la craie ou sur la graveluche. Les variations de la capacité de réserve en eau de ces deux matériaux est très grande. Il est donc nécessaire de déterminer le type de sol, avant tout projet de culture, et à fortiori, d'irrigation.

Summary

Water characteristics and moisture reserve of soils on cryoturbed chalk or chalky gravels

The water characteristics and the evolution of the moisture reserve from soils formed on cryoturbed chalk or on chalky gravels are compared.

On chalk, the soils fastly loose water and in surface dry ups. But, in depth, they have a good water reserve which the long root crops profit. This reserve renewed by the water transfers in the chalk, is satured at 53 p. 100 on the whole porosity during the dry periods.

On chalky gravels, the soils in surface have water reserve comparable with these of soils on chalk. These drainage can be slowed by the presence of a deposit. In depth the water reserve of chalky gravels is always smaller than that of the chalk. In dry year, the water can be well the bounding factor of yields.

In chalky Champagne, the water potentiel of soils depend essentially on the nature of the subsoil (chalk or chalky gravel).

Zusammenfassung

Merkmale und wasservorräte von böden auf kreide und rendsina in champagne

Die Wassermerkmale und die Entwicklung des Wasservorrats von auf frostverwirrte Kreide oder auf Rendsina ausgebildeten Böden werden verglichen.

Auf Kreide trocknen die Böden schnell wieder und entwässern sich oberflächlich. Sie besitzen doch einen guten Tiefenwasservorrat durch welchen die Kulturen mit tiefer Durchwurzelung begünstigt werden. Dieser Vorrat, der durch den Wassertransport in die Kreide erneuert ist, ist zu 53 % der gesamten Porosität während der Dürrezeiten gesättigt.

Auf Rendsina oberflächlih haben die Böden diesen der auf Kreide entwickelten Böden ähnlichen Vorraten. Ihre Wiedertrocknung mag durch die Anwesenheit von einer Verkrustung gehemmt sein. In der Tiefe ist der Wasservorrat der Rendsina immer kleiner als diesen der Kreide. Bei Trockenjahr kann Wasser den Begrenzungsfaktor der Erträge Sein.

In « Champagne Crayeuse » deswegen hängt der Bödenwasserpotential hauptsächlich von der Unterbodenbeschaffenheit (Kreide oder Rendsina) ab.

РЕЗЮМЕ

Характеры и запас воды почв на мелу и на меловом суглинке в Шампани.

БАЛЛИФ Ж.

Сравняются водные свойства и развитие запаса воды почв на меловом суглинке или на мелу, терпевшем криотурбацию.

На мелу, почвы высушиваются быстро по поверхности. Но в глубине они имеют значительный запас воды, который используют глубококорневые культуры. В засушливые времена, перемещение воды в мел возобновляет этот запас, насыщённый до 53 р. 100 общей пористости.

На меловом суглинке, запас поверхностных почв сравняется с запасом почв на мелу. Присутствие поверхностного покрова может тормозить высушивание. В глубине, запас воды в мелу всегда выше чем в меловом суглинке. Таким образом, вода может стать лимитирующим фактором урожая в засушливый год.

В меловой Шампани водный режим почв зависит, главным образом, от свойств подпочвы /мел или меловой суглинок/.

Références bibliographiques

BALLIF J. L., DUTIL P., 1971. Effet d'un film plastique sur la culture du maïs en Champagne crayeuse. *C. R. Acad. Agric. Fr.* **57** (4), 286-302.

BALLIF J. L., 1971. Irrigation des betteraves en Champagne crayeuse (Marne) Bilan 1965-1969. C.R. I.T.B.

BALLIF J. L., 1972. Evolution annuelle des profils hydriques dans les sols de la Champagne crayeuse. *Trvx, St. Sci. Sol Châlons* nº 7.

BALLIF J. L., DURAND M., DUTIL P., MULLER J., 1975. Résultats des études en cases lysimétriques. Campagnes 1973-1974 et 1974-1975. *Trvx St. Sci. Sol Châlons* nº 37.

BALLIF J. L., 1978. Porosité de la craie. Appréciation de la taille et de la répartition des pores. *Ann. agron.* **29** (2), 123-131.

BALLIF J. L., 1980. Effets de la sécheresse 1976 sur la réserve hydrique des sols de craie (sous presse).

DUTIL P., BALLIF J. L., 1968. Sur la présence fréquente en Champagne crayeuse de rendzines développées sur paléosols cryoturbés. *Sci. Sol*, 2.

DUTIL P., 1970. Caractères généraux des sols de la Champagne crayeuse. 95e *Congrès National des Sociétés Savantes, Reims, Sciences*, 215-220.

FÉODOROFF A., 1962. Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. *Ann. agron.* **13,** 523-547.

FÉODOROFF A., ARNOUX J., LECOMTE M., 1969. Une définition du « palier » de teneur en eau. *S.P.E.P.E. C.R. Réunion Fontainebleau* **1** (1), 1-13.

FÉODOROFF A., BALLIF J. L., 1969. Etude de l'infiltration de la pluie *in situ* à l'aide de tensiomètres. *Ann. agron.* **20** (5), 475-504.

RADET E., 1943. Notes sur la Champagne crayeuse. *Ann. agron.*, 136-176.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 487-489.

Chronique des livres

Sulphur in forages : Dublin, An Foras Taluntais, 1979, 264 p.

Organisé conjointement par l'Agricultural Institute d'Irlande et le Sulphur Institute (Europe) en octobre 1978 à Wexford en Irlande, ce Symposium comporte dix-sept présentations par des spécialistes venus d'Europe, d'Amérique et d'Australie. Il traite des sujets suivants :

— Le soufre fourni par l'atmosphère, les sols et les engrais.

— Le rôle du soufre dans la nutrition végétale, y compris l'interaction azote-soufre.

— Les effets du soufre sur la nutrition et la production animales.

SEEMANN J., CHIRCHOV Y. I., LOMAS J., PRIMAULT B. — *Agrometeorology*. Springer Verlag Berlin 1979, 324 p.

C'est à l'occasion d'une réunion de la Commission Agrométéorologie de l'Organisation Météorologique Mondiale qu'il fut décidé d'élaborer cet ouvrage, dans le but de donner un aperçu du domaine de travail couvert par les agrométéorologistes, et de faire le point de la recherche contemporaine.

La première partie est consacrée à la présentation détaillée des bases de l'agrométéorologie, appuyées sur des principes physiques et météorologiques : rayonnement, bilan d'énergie, transfert de masse, vent, etc...

Ensuite, dans une deuxième partie, les auteurs abordent les applications agronomiques de l'énergie d'origine météorologique. Pour accroître la productivité agricole à travers le monde, il faudrait en effet utiliser plus efficacement les ressources climatiques. C'est le but des travaux exposés dans ce chapitre.

Basé sur de nombreuses années d'expérience scientifique et pratique, cet ouvrage intéressera tout autant les étudiants et les chercheurs.

M. C. D.

WALTER Heinrich. — *Vegetation of the earth and ecological systems of the geo-biosphere*. Heidelberg sci. Lib. Springer-Verlag, New-York Ed, 2e éd., 1979, 274 p.

Il s'agit de la seconde version anglaise, revue et complétée, d'un ouvrage de H. Walter, paru à l'origine en deux volumes de langue allemande. Le titre : « Végétation de la terre » n'a pas changé, mais cette fois, l'auteur a ajouté un sous-titre : « ... et systèmes écologiques de la géobiosphère » qui se veut une indication précise du contenu de l'ouvrage.

Prenant pour base le climat, il divise la géo-biosphère en neuf zonobiomes, un biomes étant un environnement vaste et uniforme à l'intérieur de la géo-biosphère. Ces neuf zonobiomes, qui constituent les têtes de chapitre de l'ouvrage, sont les suivants :

ZB I	Equatorial (climat diurne).
ZB II	Tropical avec pluies d'été.
ZB III	Subtropical aride (climat désertique).
ZB IV	Pluies d'hiver et sécheresse estivale.
ZB V	Tempéré doux (maritime).
ZB VI	Tempéré avec courte période de gelées (nemoral).
ZB VII	Tempéré acide avec hiver froid (continental).

ZB VIII Tempéré froid (boréal).

ZB IX Arctique (et antarctique).

Chacun de ces zonobiomes est clairement défini par un type particulier de diagramme climatique et l'auteur montre qu'ils correspondent, à quelques exceptions près, à un type de sol et une zone de végétation. Ils sont réduits en subdivisions de plus en plus petites et localisées : subzonobiomes, orobiomes, pédobiomes, complexes biogéocènes, biogéocènes, enfin synusia ou écosystèmes.

L'accent est mis constamment sur les facteurs les plus importants affectant les écosystèmes : climat, producteurs biotiques, végétation, et à travers eux se fait une approche globale des problèmes complexes d'environnement.

Ecophysiologiste de renom, le Professeur Walter, à partir de son expérience d'homme de terrain, insiste sur l'urgence de maintenir un environnement sain pour l'homme moderne et de préserver les richesses naturelles du globe, notamment dans les pays en voie de développement.

M. C. D.

LUTTGE U., HIGINBOTHAM N. — *Transport in plants*. Springer Verlag, New York (USA), 1979, 469 p.

Ce livre s'adresse aux biologistes intéressés par les processus de transport de substances organiques et inorganiques dans les plantes.

Toutes les échelles de mouvements sont prises en compte, du niveau des organites cellulaires à celui de la plante entière (cas des arbres).

Outre l'introduction (chap. 1), l'ouvrage comprend quatre parties :

— La première partie traite des bases biophysiques du transport (chap. 2) et des substances transportées (chap. 3).

— La deuxième partie aborde les problèmes dus aux structures cellulaires : parois (chap. 4) et membranes (chap. 5), modèles de transport dans la cellule (chap. 6 et 7).

— La troisième partie expose les mécanismes de régulation des phénomènes de transport au niveau cellulaire : sources d'énergie (chap. 8), rôle du phytochrome et des phytohormones (chap. 9) et couplage entre les processus de transfert d'énergie et les mécanismes de transport (chap. 10).

— Enfin, la quatrième partie étudie les transports aux échelles supérieures (inter-cellulaires et inter-organes) : transport à moyenne et longue distance (chap. 11), relations entre les différents types de transport (chap. 12) et régulation du système de transport dans la plante entière (chap. 13).

Ce livre se veut à la fois didactique et au plus près des résultats de recherche récents : c'est un pari assez bien tenu.

L. C.

MARCELLE R., CLIJSTERS H., VAN POUCKE M. — *Photosynthesis and plant development*. Proceedings of a conference held at the « Limburgs Universitair Centrum ». Diepenbeek (Belgique), 23-29 juillet 1978. Dr W. Junk bv Publ. The Hague (Netherlands) 1979, 376 p.

Ce livre est le compte rendu des travaux de la conférence du « Centre Universitaire de Limburgs » qui a eu lieu à Diepenbeek (Belgique) du 23 au 29 juillet 1978.

Les travaux se sont déroulés en six sessions :

— photosynthèse et développement foliaire ;

— photosynthèse et floraison ;

— photosynthèse et nutrition minerale et régulateurs de croissance ;

— photosynthèse et relations source-puits ;

— photosynthèse et métabolisme azoté ;

— photosynthèse et pesticides, photosynthèse et infection pathogène ;

La séquence des sessions a été reprise dans la publication, bien que de nombreuses contributions puissent figurer aussi bien dans d'autres parties que celle où elles sont placées.

Comme dans tout compte rendu de congrès ou de symposium, la diversité des styles d'un auteur à l'autre est grande, l'information est le plus souvent très concrète et l'analyse percutante. Mais il ne faut pas y chercher de synthèse générale.

L. C.

BOHM W. — *Methods of studying root systems*. Berlin, Springer Verlag, 1979, 188 p.

Cet ouvrage rédigé par l'un des spécialistes de l'écologie des racines, présente clairement et de façon exhaustive (140 pages de texte, 1 000 références bibliographiques), les principales méthodes d'étude du système racinaire. Celles-ci sont regroupées selon huit grandes classes occupant chacune un chapitre. Les techniques et les problèmes généraux relatifs au lavage des racines ainsi que la mesure des principaux paramètres caractéristiques du système racinaire font l'objet de deux autres chapitres. La plus grande partie du livre est consacrée aux méthodes utilisées au champ (sept chapitres) et plus particulièrement aux méthodes classiques d'extraction (monolithes, carottes...). Les méthodes indirectes et notamment l'utilisation d'éléments radioactifs ne font l'objet que d'un seul chapitre ; il en est de même pour les techniques utilisées au laboratoire. Bien que l'auteur indique les principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes, il n'est pas possible de comparer la précision et la difficulté (temps et matériels nécessaires) de mise en œuvre de chacune d'elles. Les illustrations sont bien choisies et complètent bien le texte. Cet ouvrage traite plus des méthodes de description du système racinaire que de celles qui permettent l'étude de son fonctionnement. Cependant il doit constituer un livre de référence pour toute personne qui aborde l'observation du système racinaire.

C. V. G.

FRENCH Norman, — *Perspectives in grass and ecology*. Results and applications of the US/IBP grassland biome study. Springer Verlag, New York (USA) Ed., Série « Ecological studies » Vol. 32, 1979.

Cet ouvrage donne le résumé et la synthèse des données collectées dans le « Grassland Biome Program » qui est une part de la contribution américaine au Programme Biologique International.

Après une introduction qui présente les types et les caractéristiques générales des prairies nord américaines, les dix chapitres peuvent être regroupés selon quatre thèmes :

— production primaire et facteurs qui la contrôlent ;

— influence des consommateurs aériens et souterrains ;

— cycle de l'azote et d'autres éléments nutritifs ainsi que modélisation des différents transferts ;

— interactions des différents sous-systèmes dans les écosystèmes prairiaux.

Compte tenu de l'ampleur de chaque chapitre, les auteurs ont choisi d'insister surtout sur une présentation synthétique des données et des relations entre chaque processus. Des bibliographies à chaque chapitre et un index final facilitent la consultation de cet ouvrage.

R. B.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 491-492.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1980

N. AHO, F.-A. DAUDET, Nicole VARTANIAN. — Variations de la réserve facilement utilisable en eau du sol en relation avec différents facteurs écologiques 109

D. BAIZE. — Essai de bilan isoquartz sur un planosol du Bassin de Paris. Méthode et résultats... 337

J. L. BALLIF. — Caractères et réserves hydriques des sols sur craie et sur graveluche en Champagne 473

Huguette BESSON, Simonne CAILLÈRE, S. HÉNIN. — Comportement des ions Al et Fe en présence de silice et de cations divalents 259

M. CABELGUENNE. — Etude technique et économique de la valorisation de l'irrigation du Maïs (région Toulousaine) 319

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. I. — Description du phénomène d'adsorption 33

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. II. — Les facteurs de l'adsorption 125

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. III. — Caractéristiques générales de l'adsorption des pesticides 239

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. IV. — Conséquences des phénomènes d'adsorption.. 385

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. V. — Les méthodes d'étude de l'adsorption 413

P. CORNILLON. — *Etude bibliographique*. Incidence de la température des racines sur la croissance et le développement des plantes. 63

R. DELECOLLE, J. C. GURNADE. — Liaisons entre la morphologie du brin, le rendement de l'épi et les composantes du rendement chez le blé tendre. I. — Effet variétal 85

P. ESPIAU, G. PÉDRO. — Caractérisation du complexe d'échange des sols acides. Le taux d'acidité d'échange et sa signification pédogénétique sous climat tempéré 363

R. GRAS, J. CHIAVERINI. — Incidences du milieu et des techniques culturales sur la longévité du lavandin « Abrial » 191

G. LASCÈVE, P. COUCHAT. — Le transfert de l'eau dans la plante en régime transitoire 273

G. LEMAIRE, G. ROBERGE. — Mise au point d'un dispositif expérimental permettant de suivre la consommation hydrique d'une prairie au cours de sa croissance 455

Eliane MORÉ, M. COPPENET. — Teneurs en sélénium des plantes fourragères. Influence de la fertilisation et des apports de sélénite 297

A. MORISOT. — Déplacement avec mélange des nitrates dans un matériau de porosité bimodale. 1

R. MORLAT, J. DUPONT, J. SALETTE. — Aspects écologiques de la manifestation de la chlorose ferrique en année sèche, chez la Vigne, dans les sols calcaires de la moyenne vallée de la Loire 219

Martine OLLIVIER. — Un modèle d'action des techniques culturales sur le blé. II. — Essai de typologie des principaux départements producteurs de blé 163

J. C. RODE, O. BETHENOD. — Influence de la carence hydrique sur le comportement photosynthétique du Lin 285

P. VACHIER. — Identification des phénomènes intervenant lors du transport de solutés en solution aqueuse dans le milieu crayeux 19

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME, C. JACOB, P. ARTIS, M. CHARTIER. — Caractérisation et évolution de la structure d'un couvert végétal de Canne à sucre 429

Chronique des Livres..... 107, 487

Ann. agron., 1980, **31** (4), 493-494.

CONTENTS OF YEAR 1980

N. AHO, F.-A. DAUDET, Nicole VARTANIAN. — Variations in readily available soil water range as a function of different ecological factors. 109

D. BAIZE. — Isoquartz balance tried on a planosol from Paris Basin 337

J. L. BALLIF. — Water characteristics and moisture reserve of soils on cryoturbed chalk or chalky gravels 473

Huguette BESSON, Simonne CAILLÈRE, S. HÉNIN. — Behaviour of Al and Fe ions in presence of silica and divalent ions 259

M. CABELGUENNE. — Technical and economic survey on the cost-effectiveness of a unit of irrigation water used for maize (in the Toulouse area) 319

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review*. Adsorption of pesticides by the soils and their constituents. I. — Description of the adsorption phenomenon 33

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review*. Adsorption of pesticides by soils and their constituants. II. — The factors of the adsorption 125

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review*. Adsorption of pesticides by soils and their constituents. III. — General characteristics of the pesticides adsorption 239

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review*. Adsorption of pesticides by soils and their constituents. IV. — Consequences of adsorption phenomena 385

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review*. Adsorption of pesticides by soils and their constituents. V. — Methods of adsorption study 413

P. CORNILLON. — *Bibliographical review*. Root temperature, growth and development of plants. 63

R. DELECOLLE, J. C. GURNADE. — Relations between culm morphology, spike yield and yield components in wheat. I. — Varietal effect. 85

P. ESPIAU, G. PÉDRO. — Caracterization of the exchange complex of acid soils. The acid rate of exchange and its pedogenetic meaning under temperate climate 363

R. GRAS, J. CHIAVERINI. — Effects of the environment and cultivation techniques on the life expectancy of the « Abrial » Lavandin 191

G. LASCÈVE, Ph. COUCHAT. — Water transfer in plant 273

G. LEMAIRE, G. ROBERGE. — Development of an experimental device to follow the water demand of a meadow during its growth 455

Eliane MORÉ, M. COPPENET. — Selenium contents of forage plants. Effects of fertilization and selenite applications 297

A. MORISOT. — Miscible displacement of nitrate in aggregated media 1

R. MORLAT, J. DUPONT, J. SALETTE. — Some ecological aspects of iron chlorosis appearance during dry years in the vineyard planted on calcareous soils of the medium Loire Valley ... 219

Martine OLLIVIER. — A model of the response of wheat to agrotechnical factors. II. — Classification of the french main departments for wheat production 163

J. C. RODE, O. BETHENOD. — Photosynthetic activity after a period of water shortage in Flax. . 285

P. VACHIER. — Identification of the phenomena occurring during the transfer of aqueous-solution solutes in a chalky medium 19

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME, C. JACOB, P. ARTIS, M. CHARTIER. — Study of the canopy structure of sugar cane crop 429

Books review 107, 487

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

Le Directeur de la publication : B. HURPIN

Imprimerie Jouve, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 3-1981

Dépôt légal : 1er trimestre 1981. N° d'impression : 27782

CPPAP n° 1426-ADEP

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1980	France Prix T.T.C.	Étranger Prix net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix net
ANNALES AGRONOMIQUES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an.	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
APIDOLOGIE, 4 nos par an	100 F	175 F (sauf RFA)	30 F	50 F (sauf RFA)
* ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE				
** ANNALES DE ZOOLOGIE, ÉCOLOGIE ANIMALE				

* Les Annales de Biologie animale, Biochimie Biophysique deviennent : « Reproduction, Nutrition, Développement ».
** Les Annales de Zoologie, Ecologie animale cessent avec le n° 4, volume 11, 1979.
Les articles publiés dans cette série paraîtront désormais dans les *Œcologia. Applicata* de la revue : *Acta Œcologia.*
Pour ces 2 revues s'adresser à C.D.R. Gauthier-Villars, BP 119, 93104 MONTREUIL CEDEX. Tél. (1) 374.12.45.

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Industries agricoles et alimentaires.
170 p., 1980 ..... **90,00 F**

A quoi peut servir l'I.N.R.A. ?
82 fiches, 12 planches, 1980 ..... **40,00 F**

Utilisation par les ruminants des pâturages d'altitude et parcours méditerranéens. Xes Journées du Grenier de Theix.
576 p., 1979 ..... **110,00 F**

La Forêt et la Ville. Essai sur la forêt dans l'environnement urbain et industriel.
252 p., 1979 ..... **50,00 F**

Alimentation des ruminants. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants. Besoins alimentaires des animaux et valeur nutritive des aliments.
600 p., 1980, nouvelle édition ..... **150,00 F**

Introduction à la statistique en biologie par **S. C. Pearce,** traduction de **J. P. Doazan.**
260 p., 1978 ..... **25,00 F**

L'I.N.R.A., l'eau et la production agricole
270 p., 1978 ..... **50,00 F**

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne. Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud par le Groupe de Recherches I.N.R.A.-E.N.S. S.A.A.
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France, faunistique et biologie, par **H. Le Louarn** et **M. C. Saint Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

La Vache laitière. IXes Journées du Grenier de Theix.
342 p., 1977 ..... **60,00 F**

Amélioration génétique des animaux de ferme. Application aux bovins (sous la Direction de **B. Vissac**).
160 p., 1977 ..... **35,00 F**

Carte pédologique de la France à 1/1.000.000 par **J. Dupuis** ..... **96,00 F**

Cartes pédologiques de France à 1/100.000 ..... **96,00 F** (chacune)
(Vichy, Perpignan, Angoulême, Brives, Dijon, Toulon, Moulins, Condom, Tonnerre, Privas, St-Dié, Lesparre).

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut National de la Recherche Agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1980, **31** (4), 337-494.

Table des matières

D. BAIZE. — Essai de bilan isoquartz sur un planosol du Bassin de Paris. Méthode et résultats.... 337

P. ESPIAU, G. PÉDRO. — Caractérisation du complexe d'échange des sols acides. Le taux d'acidité d'échange et sa signification pédogénétique sous climat tempéré..... 363

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. IV. — Conséquences des phénomènes d'adsorption. 385

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Mise au point bibliographique*. Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants. V. — Les méthodes d'étude de l'adsorption..... 413

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME, C. JACOB, P. ARTIS, M. CHARTIER. — Caractérisation et évolution de la structure d'un couvert végétal de Canne à sucre 429

G. LEMAIRE, G. ROBERGE. — Mise au point d'un dispositif expérimental permettant de suivre la consommation hydrique d'une prairie au cours de sa croissance..... 455

J. L. BALLIF. — Caractères et réserves hydriques des sols sur craie et sur graveluches en Champagne 473

Chronique des livres 487

Table des matières de l'année 1980 491

Contents

D. BAIZE. — Isoquartz balance tried on a planosol from Paris Basin..... 337

P. ESPIAU, G. PÉDRO. — Characterization of the exchange complex of acid soils. The acid rate of exchange and its pedogenetic meaning under temperate climate..... 363

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review*. Adsorption of pesticides by soils and their constituents. IV. — Consequences of adsorption phenomena 385

R. CALVET, Martine TERCÉ, J. C. ARVIEU. — *Bibliographical review*. Adsorption of pesticides by soils and their constituents. V. — Methods of adsorption study..... 413

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME, C. JACOB, P. ARTIS, M. CHARTIER. — Study of the canopy structure of sugar-cane crop 429

G. LEMAIRE, G. ROBERGE. — Development of an experimental device to follow the water demand of a meadow during its growth..... 455

J. L. BALLIF. —Water characteristics and moisture reserve of soils on cryoturbed chalk or chalky gravels 473

Books review 487

Contents of year 1980..... 493

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 10-036-004-5